

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

## **ВІСНИК**

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

*Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях"*

**№ 25 (1197) 2016**

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197) – 173 с.

**Державне видання**  
**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**  
**КВ №5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.*

**Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Р. С. Томашевський, канд. техн. наук, доц.,

А.В. Грабовський, канд. техн. наук.

**Члени редколегії:** Л. Л. Брагіна, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Т. Долбня, д-р техн. наук, проф.; В. Я. Заруба, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Кліменко, д-р техн. наук, проф.; О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.; Г. І. Львов, д-р техн. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; М. І. Погорелов, канд. екон. наук, проф.; Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; Р. Д. Ситнік, д-р техн. наук, проф.; В. І. Шустіков, д-р техн. наук, проф.; О. Ю. Заковоротний, канд. техн. наук, доц.; О. О. Ларін, канд. техн. наук, доц.; В. В. Куліченко, канд. техн. наук, доц.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях», індексується в наукометричних базах **WorldCat**, **Google Scholar**, **Index Copernicus** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»  
Протокол № 6 від «08» липня 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

# **BULLETIN**

**OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”**

*Series: " New solutions in modern technologies"*

**№ 25 (1197) 2016**

Collected Works

The publication was founded in 1961

**Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.** – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 173 p.

### **State edition**

### **Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy KB №5256 from July 2, 2001**

The collection is published in Ukrainian, Russian and English.

*Bulletin of the National Technical University "KhPI" added to the "List of scientific professional publications of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences", approved by the Certifying Board of MES of Ukraine on the activity academic councils, December 15, 2015 . Order number 1328 (appendix 8) of 12.21.2015 p.*

### **Coordinating Board:**

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);

K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., доц. (**secretary**);

A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.; E. E. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.; F. F. Gladkiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Godlevskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. D. Dmitrienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. V. Epifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu. I. Zaytsev, PhD. Tech. Sci., Prof.; P. A. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.; O. K. Morachkovsky, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaenko, PhD. Hist. Sci, Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; V. A. Pulyaev, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. I. Rishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof., Yu. V. Timofeev, Dr. Tech. Sci., Prof., M. A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

### **Editorial Board:**

**Editor:** Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Secretary:** R. S. Tomashevskiy, PhD. Tech. Sci.

A. V. Grabovskiy, PhD. Tech. Sci.

**Members of the editorial board:** L. L. Bragina, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. T. Dolbnya, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. Y. Zaruba, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; B. V. Klymenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. S. Kutsenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. I. Lvov, Dr. Tech. Sci., Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; N. I. Pogorelov, PhD. Econ. Sci, Prof.; L. G. Raskin, Dr. Tech. Sci., Prof.; R. D. Sytnik, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Shustikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. U. Zakovorotnij, PhD. Tech. Sci.; A. A. Larin, PhD. Tech. Sci.; V. V. Kulichenko, PhD. Tech. Sci.

*Bulletin of the National Technical University "KPI" series "New solutions in modern technologies," scientometric databases indexed in **WorldCat, Google Scholar, Index Copernicus** and included in the directory of periodicals database **Ulrich's Periodicals Directory** (New Jersey, USA).*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"  
Protocol number 6 of July, 08, 2016

© National Technical University "KhPI", 2016

УДК 616.006.34:616-089+615.849.12+617.7

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.01

## ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КТ-ПАРАМЕТРОВ КОСТНОГО МОЗГА В ПЛАНИРОВАНИИ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ КОСТНЫХ МЕТАСТАЗОВ

Л. А. АВЕРЬЯНОВА<sup>1\*</sup>, Л. В. ТОВСТОКОРАЯ<sup>1</sup>, О. Г. АВРУНИН<sup>1</sup>, А. В. ГРУШКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра БМИ, ХНУРЭ, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Отделение ядерной медицины, ГУ «Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева, НАМНУ, Харьков, УКРАИНА

\*email: lilya.averyanova@nure.ua

**АННОТАЦИЯ** В работе рассматриваются вопросы количественного анализа состояния костного мозга в позвоночнике человека по результатам рентгеновской компьютерной томографии. Предлагается ряд КТ-параметров для получения количественной информации о состоянии трабекулярных костных структур, поврежденных метастазами. Эти результаты позволят получать необходимые данные для определения допустимой дозы нагрузки на костный мозг, а также обеспечат когнитивную морфологическую интерпретацию КТ-параметров красного костного мозга.

**Ключевые слова:** рентгеновская компьютерная томография (КТ), костный мозг, костная метастатическая болезнь, внутритканевая радионуклидная терапия, планирование

## POSSIBILITIES OF DETERMINATION OF BONE MARROW CT-PARAMETERS FOR BONE METASTASES RADIONUCLIDE THERAPY PLANNING

L. AVERYANOVA<sup>1\*</sup>, L. TOVSTOKORAYA<sup>1\*</sup>, O. AVRUNIN<sup>1</sup>, A. GRUSHKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BME, KhNURE, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> State Institution «Grigoriev Institute for Medical Radiology of NAMS of Ukraine», Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** This work is devoted to task of quantitative analysis of the bone marrow status in the human spine using the results of X-ray computed tomography. The approaches to estimation CT parameters of bone structures for patients with bone metastases are proposed. Currently the task of choice of software tools for calculation of actual volume of red bone marrow before and during the interstitial radionuclide therapy is not considered fundamentally. The goal of this study is to analyze the methods for quantitative assessment of red bone marrow volume in the vertebrae based on the results of CT imaging for estimation degree of damage of bone marrow for correction required dose of the radiopharmaceutical in radionuclide therapy. This research deals with method that based on the analysis of Hounsfield units (HU) in lumbar vertebrae L1-L5 using CT-scans. The values of HU of each vertebra were determined by contouring the region of interest – trabecular filling of vertebral bodies. The calculation of HUmean, HUmin and HUmax in contoured region of interest were determined using graphical tool for ellipse contouring in DICOM-viewer eFilmLite. The Hounsfield units were compared for three CT-scans of one patient with bone metastatic disease during year. The values of mean, maximal and minimal HU for vertebral bodies indicate the presence of pathological non-uniformities: the centers of the destruction and multiple sclerosis confirmed by the medical conclusions based on CT-scans. Obtained results are correlated with the physiological interpretation of CT parameters. The increase of HUmax can be related to the metastatic disease progression. The next step will be devoted to choice of suitable tools for processing of different pathological zones inside every vertebral body because trivial averaging of HU hides real proportion between trabecular volume and volume of bone marrow in case of metastatic lesion. The more productive method is to use 3D reconstruction with volumetric segmentation of vital bone structures. This approach will allow in future obtaining the necessary data to determine actual bone marrow volume for calculation of individual admissible radiation dose for interstitial radionuclide therapy.

**Keywords:** X-ray computed tomography (CT), bone marrow, bone metastatic disease, interstitial radionuclide therapy, planning

### Введение

Проблема лечения вторичных опухолевых очагов является одной из сложнейших проблем современной онкологии. Особо часто выявляется метастатическое поражение костей – наиболее явный признак прогрессирования онкологических заболеваний, причем около 60% случаев метастазирования приходится на позвоночник [1]. Зачастую метастатические повреждения приводят к патологическим переломам позвонков и компрессии спинного мозга, приводящих к интенсивной боли и обездвиживанию больных.

Для лечения больных с метастазами в кости применяются различные методы, одним из наиболее эффективных является внутритканевая радионуклидная терапия (РНТ) остеотропными радиофармпрепаратами (РФП) на основе β-излучающих изотопов. В мире успешно используется остеотропный РФП <sup>153</sup>Sm-оксабифор [2, 3]. Однако выбор дозировки этого радиоактивного препарата требует строгого обоснования, поскольку необходимо предотвратить дальнейшее повреждение костных структур и костного мозга [4]. Красный костный мозг (ККМ) является наиболее радиочувствительной структурой.

В связи с этим качество планирования РНТ напрямую зависит от предварительной комплексной оценки как структурных, так и функциональных параметров ККМ. Одним из важных путей неинвазивного исследования состояния костного мозга является анализ медицинских изображений различных модальностей – рентгеновской компьютерной томографии (КТ), радионуклидной визуализации (ОФЭКТ, ПЭТ), магниторезонансной томографии (МРТ) [5-8].

### Актуальность

Анализ современной зарубежной литературы показал, что актуальной в настоящее время задачей в радиоонкологии является прогностическая дозиметрия красного костного мозга, позволяющая предсказать повреждающее действие РФП на кроветворную ткань ККМ (миелотоксичность). Сложность этого прогноза обусловлена дозиметрической неопределенностью, индивидуальной чувствительностью и биологическими эффектами предыдущего лечения [4]. Улучшение соотношения «доза-миелотоксичность» в паллиативной терапии костных метастазов с использованием РФП  $^{153}\text{Sm}$ -оксабифор представляет сложность из-за ряда факторов, требующих индивидуального подхода к каждому пациенту. Необходимо в комплексе использовать различные методы анализа состояния костного мозга – как лабораторно-аналитические, так и визуализационные. Поскольку РНТ является методом системного действия, для определения дозы на ККМ необходимо оценить его объем во всем организме, исходя как из антропометрических данных, так и используя индивидуальные показатели, полученные при анатомической и функциональной визуализации. Однако, метастатические поражения из-за своего различного строения (остеолитические, остеобластические, смешанные) и случайного расположения в костных структурах усложняют анализ томографических изображений. Поэтому уточнение индивидуальных показателей состояния ККМ в процессе РНТ требует построения более сложных алгоритмов распознавания и количественной оценки состояния структур трабекулярной кости.

### Анализ литературных данных и постановка задачи

Исследование КТ-параметров костного мозга, необходимых в процессе изучения состояния позвонков пациента во время костной метастатической болезни, проводится в разных направлениях [5, 7-9]. Сейчас эта задача относится не только к медицинской диагностике, но и к области биологического материаловедения.

Одним из перспективных методов изучения микроархитектуры образцов трабекулярной костной ткани является лабораторная микро-КТ (microCT) [10-12]. Воксельная разрешающая способность микроКТ-сканов достигает 10 мкм [12]. Метод микро-КТ

позволяет определить следующие параметры трабекулярной кости: объемная фракция (bone volume/total volume, BV/TV, %), толщина костной трабекулы (TbThmm), межтрабекулярный промежуток (TbSp, mm), который как раз и представляет интерес при определении объема ККМ.

Известно также успешное применение метода периферической количественной КТ (HR-pQCT) для клинической визуализации микроструктуры кости, при этом пространственное разрешение составляет 200-500 мкм [13]. Однако наиболее часто в клинической практике применяется мультidetекторная КТ (MDCT), которая, к сожалению, позволяет достичь разрешения на уровне 0,5-1 мм [5]. Однако такое разрешение не позволяет отождествить истинную морфологическую структуру трабекулярной кости с ее КТ-структурой, поскольку размеры костной трабекулы составляют 0,25-0,7 мм, расстояния между ними 0,1-1,0 мм.

Ранее уже были предложены КТ-параметры для количественной оценки состояния костных структур позвоночника [14], однако в основном известные подходы касались остеопоротических изменений в телах позвонков. Но при костной метастатической болезни нарушения костных структур иные и должны быть рассмотрены в неразрывной связи с течением этого патологического процесса. Кроме того, есть некоторые технические ограничения существующих программных средств анализа КТ-изображений и неопределенности при изучении трабекулярных костных структур позвоночника в связи с особенностями патологических изменений. Задача создания программных средств комплексной оценки состояния ККМ при проведении РНТ также основательно не рассматривалась.

### Цель работы

Поиск методов количественной оценки состояния красного костного мозга в позвонках пациентов с костной метастатической болезнью по результатам их КТ-визуализации для оценки степени его поражения и уточнения необходимой дозы РФП  $^{153}\text{Sm}$ -оксабифор в РНТ костных метастазов.

### КТ-параметры костных структур в позвонках

Методы, используемые для оценки дозы от внешних источников (внешние по отношению к кости, не обязательно к телу), делятся на две основные категории: методы, которые относятся к кости или губчатому веществу в качестве однородной ткани и методы, которые наиболее точно определяют сложную гетерогенную смесь костных структур.

В соответствии с руководящими принципами Европейской ассоциации ядерной медицины (EANM) [4, 6], для улучшения соотношения «доза-миелотоксичность» можно оценить пациент-специфическую массу костного мозга ( $m_{BM1}$ ) с

помощью линейного масштабирования эталонной массы костного мозга человека ( $m_{ВМ0}$ )

$$m_{ВМ1} \approx m_{ВМ0} \cdot \frac{AP_1}{AP_0},$$

где  $AP_1$  - значение антропометрического параметра для пациента;

$AP_0$  - значение антропометрического эталонного параметра (для мужчины или женщины). Однако в этом расчете нет привязки к другим индивидуальным показателям, нежели рост и вес, которые могут быть получены по результатам томографической визуализации.

На начальном этапе необходимо определить, какие из доступных для обнаружения по КТ-снимкам параметров будут необходимы в процессе лечения костной метастатической болезни. Анализировать КТ-параметры костного мозга предлагается по КТ-срезам в области поясничных позвонков L1-L5. Один из таких параметров – объем трабекулярного вещества (TV, trabecular volume) – определяется путем оконтуривания и расчета внутреннего объема трабекулярной ткани позвонка на каждом КТ-срезе, за исключением внешней кортикальной кости и межпозвоночных дисков. Известна также оценка среднего в объеме числа Хаунсфилда [15] (рис.1).

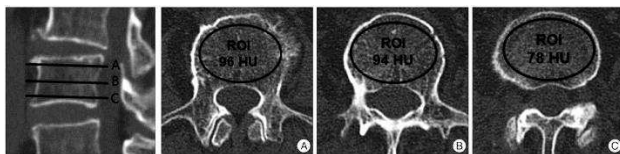


Рис. 1 – КТ-сканы позвонка L3 с определением области интереса и среднего числа Хаунсфилда [15]

Однако, только по данным КТ невозможно получить информацию о функциональном состоянии сохранившегося ККМ к моменту начала лечения. Для получения этой информации потребуются более углубленный анализ трабекулярной ткани тел позвонков по изображениям других модальностей.

### Обсуждение результатов

Был проведен компьютерный анализ КТ-изображений тел поясничных позвонков L1-L5 у пациента с костной метастатической болезнью (рис.2). Данные КТ предоставлены в рамках выполнения совместного научного проекта НАМН Украины № ДР 0115U003003 «Вибір тактики лікування кісткових метастазів <sup>153</sup>Sm-оксабифором для зниження ризиків ускладнень». Для обработки изображений использован DICOM-вьювер eFilmLite.

С помощью графического инструмента Ellipse проводилось эллипсовидное оконтуривание внутреннего трабекулярного объема на срезах тел пяти поясничных позвонков L1-L5 (рис.1) и расчет значений чисел Хаунсфилда внутри оконтуренного

участка: среднего (HU mean), максимального (HU max) и минимального (HU min).

Результаты определения значений HU mean, максимального HU max и минимального HU min представлены на рис.3, где отражена динамика изменения этих КТ-параметров позвонков пациента по трем исследованиям с интервалом в полгода. Описание КТ позвонков:

1) В теле L1 определяются очаги деструкции и склероза, размерами до 17 мм. Определяется гемангиома до 16x37 мм.

2) В теле L1 определяются очаги деструкции и склероза, размерами до 35x29мм. Появились новые очаги склероза в телах позвонков до 13 мм в диаметре.

3) В теле L1 определяются очаги деструкции и склероза, размерами до 35x29мм. Сохраняются очаги склероза в телах позвонков. Сохраняется гемангиома 16x37.

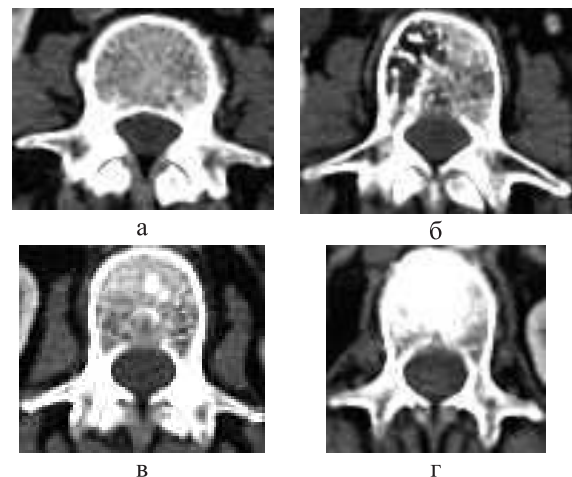


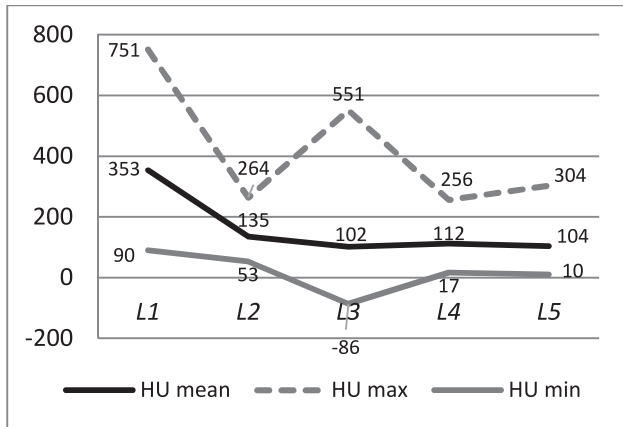
Рис. 2 – КТ-срезы поясничных позвонков L1-L4: а – L4, однородная трабекулярная структура; б – L3, гемангиома; в – L2, островки склероза; г – L1, склерозирование тела позвонка

На построенных диаграммах, приведенных на рис. 4, можно обнаружить изменения, которые происходили с костными структурами в течение года.

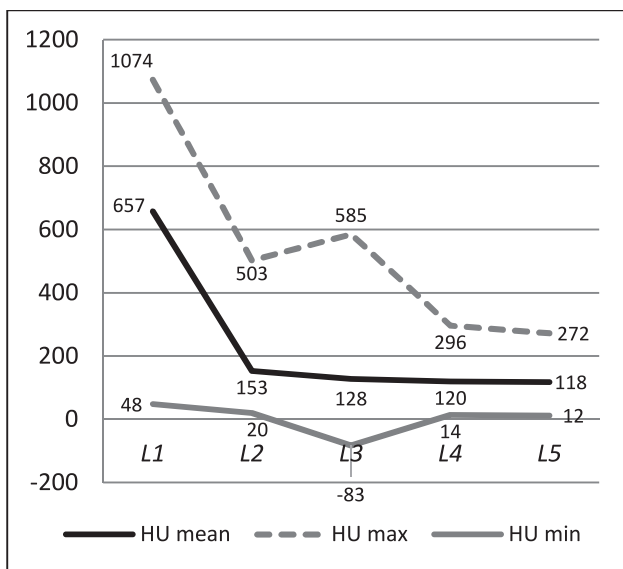
В теле L1 общее увеличение площади очага склероза (рис.2г) можно оценить по возрастанию значения HUmean от 353 до 748. Увеличение значений HUmax от 751 до 1119 говорит о существенном уплотнении очага склероза.

В теле L2 отмечается постепенное уплотнение трабекулярного рисунка (HUmax от 264 до 707), в том числе из-за появления костных островков – очагов склероза (рис. 2в).

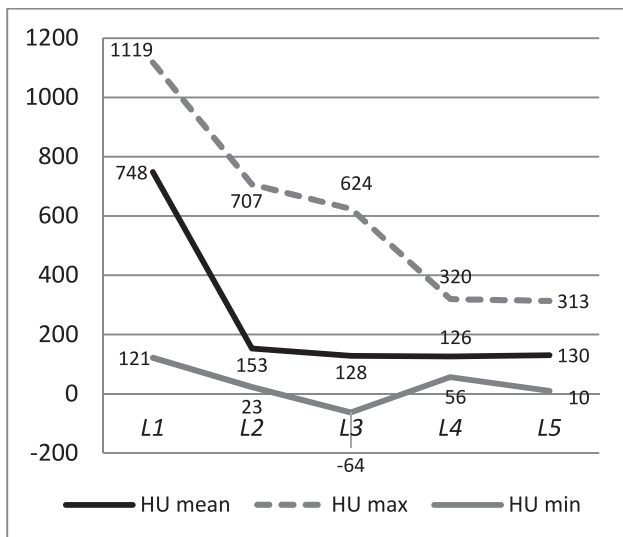
В теле L3 минимальное значение числа Хаунсфилда – отрицательное (HUmin от -86 до -64), что указывает на наличие жировой ткани. В то же время завышенное значение HUmax (от 551 до 624)



a



б



в

Рис. 3 – Распределение чисел Хаунсфилда HU в выделенных областях тел позвонков L1-L5: а – при первом КТ-сканировании; б – через полгода; в – через год

указывает на наличие плотных костных включений (рис. 2б). Наличие в теле позвонка мягкотканного новообразования (гемангиомы) снижает общее среднее значение HUmean до 102÷128, что ошибочно может считаться возрастной нормой, если упустить особенности поврежденной структуры этого позвонка.

В теле L4 и L5 существенных структурных изменений не наблюдается, плавное возрастание значений HUmax и HUmean может быть связано с уплотнением трабекул. В то же время HUmin не изменяется, т.е. вероятно, что ККМ находится в норме.

Приведенный анализ КТ-параметров HUmean, HUmax и HUmin показывает, что каждый из них характеризует определенные структурные особенности, а в комплексе они подтверждают врачебное описание состояния тел позвонков и даже дополняют его новыми упущенными деталями.

Из данного примера видно, что применение простого вычисления значений HU в выделенной области недостаточно. Обязательно нужно определить пропорции размеров тел позвонков, ибо наличие компрессионных микропереломов может «сжать» позвонок, но при этом значение HUmean изменится незначительно, а это в нашем измерении может быть ошибочно принято за норму.

Для полного понимания степени нарушений в телах поясничных позвонков пациента нужно сравнить средние показатели HUmean с нормой в соответствии с возрастом. На рис. 4 приведена диаграмма, построенная на основе данных, полученных при компьютерном анализе тел поясничных позвонков L1-L4 у пациентов разных возрастных групп [15], куда для сравнения добавлена линия HUmean с рис. 3а (результат первого КТ-обследования пациента).

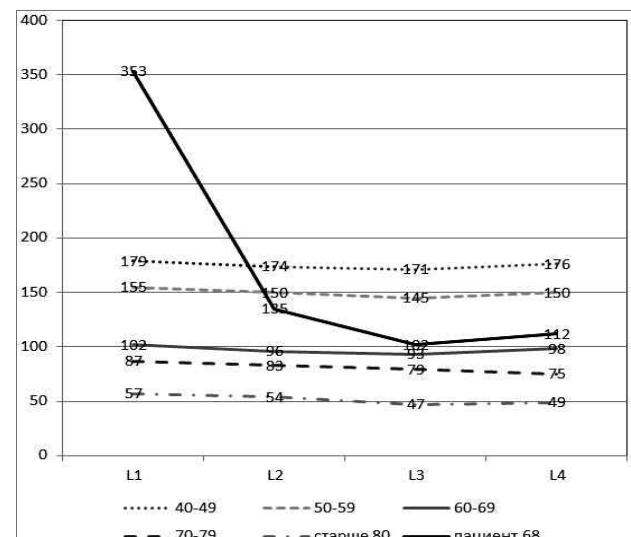


Рис. 4 – Средние значения HUmean в норме для L1-L4 в разных возрастных группах в сравнении с данными пациента (см. рис.3а)



Видно также, что значения HUmean для L3 и L4 близки к возрастной норме в интервале 60-69 лет. Значения для L2 и особенно для L1 при первом же обследовании демонстрируют резкое отклонение от возрастной нормы.

### Выводы

Проведенный анализ существующих возможностей раздельного определения объема ККМ по результатам КТ-сканирования показывает, что ограниченная разрешающая способность обычного КТ-изображения не позволяет сегментировать трабекулярную костную ткань и ее заполнение. Косвенная оценка объема ККМ в случае костной метастатической болезни должна производиться с учетом поврежденных объемов кости. Также следует соотносить КТ-параметры позвонков с метастатическими поражениями с такими же параметрами для здоровых людей того же возраста. Показано, что даже использование стандартных инструментов анализа КТ-срезов позволяет получить количественные данные об изменениях в поврежденных телах позвонков, в том числе в динамике. Для расчета общего объема ККМ при планировании радионуклидной терапии необходимо создать специализированное программное средство, в котором на основе 3D визуализации костей с метастазами будут сегментированы и вычислены объемы неповрежденных структур с сохраненным ККМ.

### Список литературы

- 1 **Kakhki, V. R.** Pattern and distribution of bone metastases in common malignant tumors / **V. R. Kakhki** et al. // *Nucl. Med. Rev. Cent. East Eur.* – 2013. – 16(2). – P. 66-9. – doi: 10.5603/NMR.2013.0037.
- 2 **Carlo L. Maini** <sup>153</sup>Sm-EDTMP for bone pain palliation in skeletal metastases / **Carlo L. Maini** et al. // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2004. – 31 (1). – P. 171-178. – doi: 10.1007/s00259-004-1540-y.
- 3 **Bauman, G.** Radiopharmaceuticals for the palliation of painful bone metastasis - a systemic review / **G. Bauman** et al. // *Radiother Oncol.* – 2005. – 75(3). – P. 258-70.
- 4 **Hindorf, C.** EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry / **C. Hindorf** et al. // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2010. – 37(6). – P. 1238-50. – doi: 10.1007/s00259-010-1422-4.
- 5 **Henes, Frank Oliver** Detection of occult vertebral fractures by quantitative assessment of bone marrow attenuation values at MDCT / **Henes, Frank Oliver** et al. // *European Journal of Radiology.* – 2013. – Vol. 83, Is. 1. – P. 167-172. – doi: 10.1016/j.ejrad.2013.09.015.
- 6 **Massimiliano Pacilio** Improving the dose–myelotoxicity correlation in radiometabolic therapy of bone metastases with <sup>153</sup>Sm-EDTMP / **Massimiliano Pacilio** et al. // *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* – 2014. – 41. – P. 238-252. – doi: 10.1007/s00259-013-2552-2.
- 7 **Nishida, Y.** Clinical and prognostic significance of bone marrow abnormalities in the appendicular skeleton detected by low-dose whole-body multidetector computed tomography in patients with multiple myeloma / **Y. Nishida,**

- Y. Matsue, Y. Suehara,** et al. // *Blood Cancer Journal.* 2015. – 5(7). – 329 p. – doi:10.1038/bcj.2015.57.
- 8 **Scutellari, P. N.** Metastatic bone disease. Strategies for imaging / **P. N. Scutellari, G. Antinolfi, R. Galeotti, M. Giganti** // *Minerva Med.* – 2003. – 94(2). – P. 77-90.
- 9 **Krishnakumar Ramachandran** Comparison of Tc-99m MDP and Sm-153 EDTMP bone scan / **Krishnakumar Ramachandran** et al. // *Indian J. Nucl. Med.* – 2011. – 26(3). – P. 163-164. – doi: 10.4103/0972-3919.104005.
- 10 **Yuchin Wu** Using micro-CT derived bone microarchitecture to analyze bone stiffness – a case study on osteoporosis rat bone / **Yuchin Wu** et al. // *Front. Endocrinol.* – 2015. – doi: 10.3389/fendo.2015.00080.
- 11 **Hsu, J-T.** A Comparison of Micro-CT and Dental CT in Assessing Cortical Bone Morphology and Trabecular Bone Microarchitecture / **Hsu, J-T.** et al. // *PLoS ONE.* – 2014. – 9(9). – e107545. – doi:10.1371/journal.pone.0107545.
- 12 **Ian H. Parkinson** Characterisation of Trabecular Bone Structure / **Ian H. Parkinson, Nicola L. Fazzalari** // *Stud. Mechanobiol Tissue Eng. Biomater.* – 2013. – 5. – P. 31-51. – doi: 10.1007/8415\_2011\_113.
- 13 **Kyle K. Nishiyama** Clinical Imaging of Bone Microarchitecture with HR-pQCT / **Kyle K. Nishiyama, E. Shane** // *Curr Osteoporos Rep.* – 2013. – 11(2). – 147-155. – doi: 10.1007/s11914-013-0142-7.
- 14 **Аверьянова, Л. А.** Оценка КТ-параметров костной ткани в планировании внутритканевой радионуклидной терапии / **Л. А. Аверьянова** [и др.] // *Вестник НТУ "ХПИ", Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 39 (1148). – С. 68-72.
- 15 **Sungjoon Lee** Correlation between Bone Mineral Density Measured by Dual-Energy X-Ray Absorptiometry and Hounsfield Units Measured by Diagnostic CT in Lumbar Spine / **Sungjoon Lee** et al. // *J. Korean Neurosurg Soc.* – 2013. – 54(5). – P. 384-389. – doi: 10.3340/jkns.2013.54.5.384.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Kakhki, V. R.** et al. Pattern and distribution of bone metastases in common malignant tumors. *Nucl Med Rev Cent East Eur.* 2013, **16**(2), 66-9, doi: 10.5603/NMR.2013.0037.
- 2 **Carlo L. Maini** et al. <sup>153</sup>Sm-EDTMP for bone pain palliation in skeletal metastases. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2004, **31**(1), 171-178, doi: 10.1007/s00259-004-1540-y.
- 3 **Bauman Get** et al. Radiopharmaceuticals for the palliation of painful bone metastasis - a systemic review. *Radiother Oncol.* 2005, **75**(3), 258-70.
- 4 **Hindorf, C.** et al. EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2010, **37**(6), 1238-50, doi: 10.1007/s00259-010-1422-4.
- 5 **Henes, Frank Oliver** et al. Detection of occult vertebral fractures by quantitative assessment of bone marrow attenuation values at MDCT. *European Journal of Radiology,* 2013, **83**(1), 167-172, doi: 10.1016/j.ejrad.2013.09.015.
- 6 **Massimiliano Pacilio** et al. Improving the dose–myelotoxicity correlation in radiometabolic therapy of bone metastases with <sup>153</sup>Sm-EDTMP. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2014, **41**, 238-252, doi: 10.1007/s00259-013-2552-2.
- 7 **Nishida, Y., Matsue, Y., Suehara, Y.** et al. Clinical and prognostic significance of bone marrow abnormalities in the appendicular skeleton detected by low-dose whole-body multidetector computed tomography in patients with multiple

- myeloma. *Blood Cancer Journal*. 2015, **5**(7), e329, doi:10.1038/bcj.2015.57.
- 8 **Scutellari, P. N., Antinolfi, G., Galeotti, R., Giganti, M.** Metastatic bone disease. Strategies for imaging. *Minerva Med.* 2003, **94**(2), 77-90.
- 9 **Krishnakumar Ramachandran et al.** Comparison of Tc-99m MDP and Sm-153 EDTMP bone scan. *Indian J Nucl Med.* 2011, **26**(3), 163-164, doi: 10.4103/0972-3919.104005
- 10 **Yuchin Wu, Samer Adeeb, Michael R. Doschak.** Using micro-CT derived bone microarchitecture to analyze bone stiffness – a case study on osteoporosis rat bone. *Front. Endocrinol.* 2015, doi: 10.3389/fendo.2015.00080.
- 11 **Hsu J-T, Chen Y-J, Ho J-T, Huang H-L, Wang S-P, Cheng F-C,** et al. A Comparison of Micro-CT and Dental CT in Assessing Cortical Bone Morphology and Trabecular Bone Microarchitecture. *PLoS ONE*. 2014, **9**(9), e107545, doi:10.1371/journal.pone.0107545.
- 12 **Ian H. Parkinson, Nicola L. Fazzalari** Characterisation of Trabecular Bone Structure. *Stud Mechanobiol Tissue Eng Biomater.* 2013, **5**, 31-51, doi: 10.1007/8415\_2011\_113.
- 13 **Kyle K. Nishiyama, Elizabeth Shane.** Clinical Imaging of Bone Microarchitecture with HR-pQCT *Curr Osteoporos Rep.* 2013, **11**(2), 147-155, doi: 10.1007/s11914-013-0142-7
- 14 **Averyanova, L.** et al. Estimation of bone tissue CT-parameters for interstitial radionuclide therapy planning. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, **39** (1148), 68-72.
- 15 **Sungjoon Lee, Chun Kee Chung, So Hee Oh, Sung Bae Park** Correlation between Bone Mineral Density Measured by Dual-Energy X-Ray Absorptiometry and Hounsfield Units Measured by Diagnostic CT in Lumbar Spine. *J Korean Neurosurg Soc.* 2013, **54**(5), 384-389, doi: 10.3340/jkns.2013.54.5.384

#### Сведения об авторах (About authors)

**Аверьянова Лилия Александровна** – к.т.н., доц., кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина; e-mail: lilya.averyanova@nure.ua.

**Averyanova Lilya** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; lilya.averyanova@nure.ua.

**Товстокорая Лолита Владиславовна** – студент, кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина; e-mail: lolita.tovstokoraya@yandex.ru.

**Tovstokoraya Lolita** – student, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: lolita.tovstokoraya@yandex.ru.

**Аврунин Олег Григорьевич** – д.т.н., проф., кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: gavrun@list.ru.

**Avrunin Oleg** – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: gavrun@list.ru.

**Грушка Анна Васильевна** – к.м.н., с.н.с. Государственное учреждение «Институт медицинской радиологии им. С.П. Григорьева НАМН Украины», Харьков, Украина; e-mail: grushka.ganna@ukr.net.

**Grushka Anna** – Candidate of Medical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, State Institution «Grigoriev Institute for Medical Radiology of NAMS of Ukraine», Kharkiv, Ukraine; e-mail: grushka.ganna@ukr.net.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

**Аверьянова Л.А.** Возможности определения КТ-параметров костного мозга в планировании радионуклидной терапии костных метастазов / **Л.А. Аверьянова, Л.В. Товстокорая, О. Г. Аврунин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 5-10. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.01.

Please cite this article as:

**Averyanova, L., Tovstokora, L., Avrunin, O., Grushka, G.** Possibilities of determination of bone marrow CT-parameters for bone metastases radionuclide therapy planning. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 5-10, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.01.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

**Авер'янова, Л. А.** Можливості визначення КТ-параметрів кісткового мозку в плануванні радіонуклідної терапії кісткових метастазів / **Л. А. Авер'янова, Л. В. Товстокора, О. Г. Аврунін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 5-10. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.01.

**АНОТАЦІЯ** У роботі розглядаються питання кількісного аналізу стану кісткового мозку в хребті людини з використанням результатів рентгенівської комп'ютерної томографії. Пропонується ряд КТ-параметрів для отримання кількісної інформації про стан трабекулярних кісткових структур, ушкоджених метастазами. Ці результати дозволять отримувати необхідні дані для визначення припустимого дозного навантаження на кістковий мозок, а також забезпечать непряму морфологічну інтерпретацію КТ-параметрів червоного кісткового мозку.

**Ключові слова:** рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ), кістковий мозок, метастатична хвороба кісток, внутрішньотканинна радіонуклідна терапія, планування

Поступила (received) 01.07.2016

УДК 615.47

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02

## ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КРОВЕНОСНОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И ТРЕНИРОВКИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ

**О. Г. АВРУНИН, М. Ю. ТЫМКОВИЧ\*, А. И. БЫХ**

*Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА  
\*email: maxim\_tymkovich@ukr.net*

**АННОТАЦИЯ** Работа посвящена построению трехмерной модели кровеносной системы головного мозга человека, применительно к задачам планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств. Предложены основные этапы обеспечивающие построение трехмерной модели на основании параметрических данных, а также её математического описания. Показана возможность использования разработанного подхода для обеспечения обучения проведения нейрохирургического виртуального вмешательства, а в последующем, с использованием быстрого 3d прототипирования, и реального.

**Ключевые слова:** кровеносная система, моделирование, мозг, операция, нейрохирургия, планирование

## CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL OF CIRCULATORY SYSTEM OF THE BRAIN FOR PLANNING AND TRAINING OF NEUROSURGICAL INTERVENTIONS

**O. AVRUNIN\*, M. TYMKOVYCH\*, A. BYKH**

*Department of biomedical engineering, Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** Currently, functional surgery on the human brain are closely linked to the planning stage. One of the most dangerous during surgery, are excision of a brain blood vessels, this can be fatal. Therefore, the main objective of this work was to develop a method for constructing a three-dimensional model of the brain circulatory system for planning tasks and training tasks for neurosurgery. The study examined the anatomical structure of the vascular system of the brain, from the point of view of the possibility of its three-dimensional parametric reconstruction; formed principles describe a model using the graph, as well as a three-dimensional mathematical formalism; defined stages of building such a model. The developed method for constructing a three-dimensional model of the brain circulatory system is an important component in providing training neurosurgeons. Construction of three-dimensional model of the vascular system of the brain is carried by the following steps: initialization parameters, build a skeleton, detalization of the skeleton; construction of the volume of model and rasterization. This approach, in addition the possibility of simulating different structural variations of the circulatory system does not require real tomographic data, and thus meets the requirements of medical ethics. The next step is to obtain the data for the full three-dimensional model of the bloodstream. For a more accurate reproduction of the models, we should use the data of digital subtraction angiography, together with methods of machine learning. In the future, this approach, together with the pre-planning, as well as three-dimensional printing technology should provide substantive training of the surgery.

**Keywords:** circulatory system, modeling, brain, intervention, neurosurgery, planning,

### Введение

В настоящее время, проведение функциональных хирургических вмешательств на головном мозге человека основано на этапе компьютерного планирования [1-3]. Это в первую очередь объясняется сложностью непосредственного хирургического доступа применительно к функциональным структурам, в особенности к глубинным структурам мозга, к примеру, передние ядра таламуса, хвостатые ядра, вентрально-латеральные ядра таламуса, педунклопонтинное ядро и т.п. [4-7].

### Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблеме разработки методов и средств планирования нейрохирургических вмешательств посвящено огромное количество работ, например [8-12]. Так, необходимость использования программных методов, при выборе траектории хирургического вмешательства, показана в исследовании [8], кроме того, произведена оценка рисков хирургического вмешательства, выбранного вручную (нейрохирургом), а также автоматически.

Результативность использования методов компьютерного планирования при стимуляции глубинных структур головного мозга показано в работе [9] на примере 166 пациентов.

Использованию данных цифровой вычитательной ангиографии при хирургическом планировании оперативного вмешательства посвящено исследование [10], в нем доказана эффективность метода путем анализа 191 случая.

В работе [11] разработан оригинальный подход к поиску нелинейной траектории хирургического доступа с учетом положения кровеносных сосудов. Для сокращения времени расчета алгоритм был распараллелен и исполнен на кластере Beowulf.

Также, в исследовании [12] рассматривается оригинальный метод выбора риска хирургического вмешательства и его оптимизация.

В то же время, другим направлением исследователей, является использование технологий 3d печати для натурального планирования нейрохирургического вмешательства, и тренировки [13-16].

Так показана эффективность использования 3d прототипирования сложных объектов для задач нейрохирургии, а именно построение моделей обеспечивающих симуляцию проведения реального оперативного вмешательства [13].

Построение моделей осуществлялось по данным КТ и МРТ, а проведение тренинга, в исследовании, осуществлялось с использованием Medtronic S7 и BrainLAB Kolibri [14].

Как видно из рассмотренных источников, важным элементом проведения хирургического вмешательства является этап планирования. Одновременно, следует принять во внимание, что наиболее опасным, при проведении хирургического вмешательства, является иссечение кровеносных сосудов головного мозга [17-18], что может привести к летальному исходу.

#### Цель и задачи исследования

Поэтому основной целью данной работы являлось разработать метод построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга для задач планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть анатомическое строение сосудистой системы головного мозга человека;
- сформировать математическое описание структуры головного мозга с использованием подходящего математического аппарата;
- определить основные этапы построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга;
- изучить возможности использования разработанного подхода для обучения нейрохирургов.

#### Анализ структуры кровеносной системы головного мозга

Наибольший интерес представляет артериальная система. Как известно, компонентный состав артериальной системы головного мозга состоит из следующих кровеносных сосудов табл. 1 [19-20].

Таблица 1 – Артерии головного мозга

| №  | Артерия                    | №  | Артерия                       |
|----|----------------------------|----|-------------------------------|
| 1  | Аорта                      | 11 | Поверхностно-височная артерия |
| 2  | Плечеголовной ствол        | 12 | Внутренняя сонная артерия     |
| 3  | Подключичная артерия       | 13 | Позвоночная артерия           |
| 4  | Общая сонная артерия       | 14 | Базиллярная артерия           |
| 5  | Наружная сонная артерия    | 15 | Задняя мозговая артерия       |
| 6  | Верхняя щитовидная артерия | 16 | Глазная артерия               |
| 7  | Язычная артерия            | 17 | Задняя соединяющая артерия    |
| 8  | Лицевая артерия            | 18 | Средняя мозговая артерия      |
| 9  | Затылочная артерия         | 19 | Передняя мозговая артерия     |
| 10 | Верхнечелюстная артерия    |    |                               |

В табл. 1 большинство артерий являются парными, некоторые только питают другие артерии, а ткани головы непосредственно не питают.

Исходя из соединения кровеносных сосудов, был сформирован граф (рис. 1). Наибольший интерес, при симуляции нейрохирургического вмешательства представляет верхняя центральная часть графа, содержащая Виллизиев круг. В свою очередь, данный граф не является достаточно детализированным представлением кровеносной системы, так как в нем не представлены сегменты данных кровеносных сосудов.

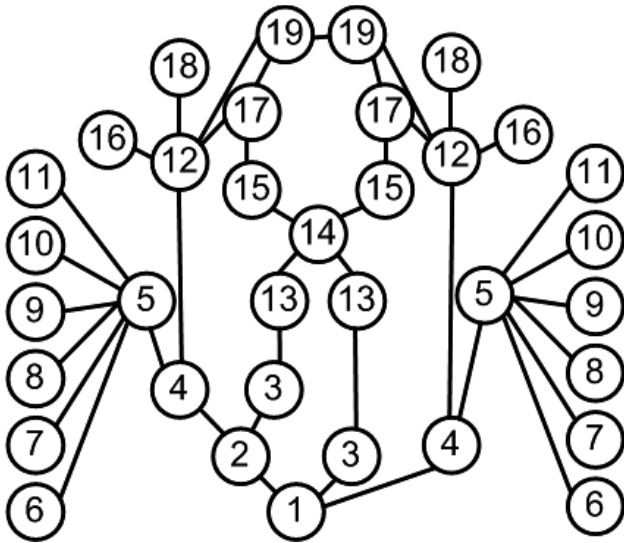


Рис. 1 – Граф соединения кровеносных сосудов

### Построение трехмерной модели сосудистой системы головного мозга

Построение трехмерной модели сосудистой системы головного мозга осуществляется следующим образом (рис. 2).

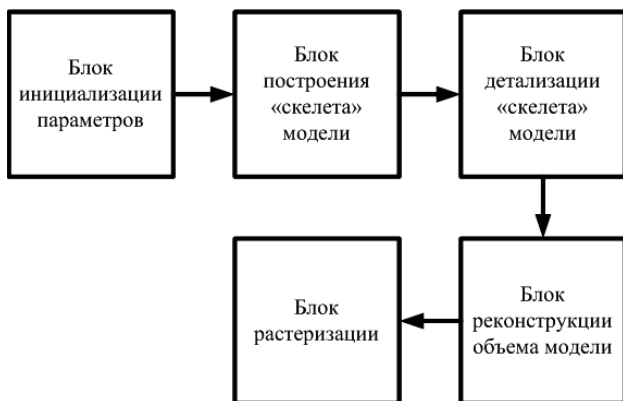


Рис. 2 – Схема построения трехмерной модели сосудистой системы головного мозга

На первом этапе, осуществляется инициализация исходных параметров. Исходными параметрами являются типичные значения диаметров кровеносных сосудов, длины сегментов, ориентация и т.п. Выбор осуществляется случайным образом на основе нормального распределения (1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – среднее значение параметра;  
 $\sigma$  – дисперсия параметра.

Исходя из графа (рис. 1) производится построение «скелета» модели (рис. 3). В качестве базовой структуры удобно использовать базилярную

артерию. Таким образом, расчет точек скелета ( $p$ ) осуществляется путем расчета всех сегментов артерии по длине ( $l$ ) и ориентации ( $\theta, \varphi$ ):

$$\begin{cases} p_{i+1}^x = p_i^x + l \cdot \sin \varphi \cos \theta; \\ p_{i+1}^y = p_i^y + l \cdot \sin \varphi \sin \theta; \\ p_{i+1}^z = p_i^z + l \cdot \cos \theta, \end{cases} \quad (2)$$

В свою очередь, параметры  $l, \theta, \varphi$  выбираются исходя из (1).

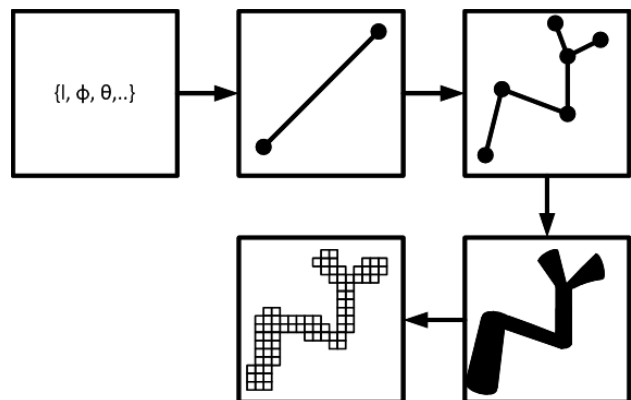


Рис. 3 – Результаты на разных этапах построения трехмерной модели

Детализация осуществляется путем использования рекурсивной функции, с глубиной исполнения  $D$ . Параметр глубины исполнения является специфичным для конкретной артерии. Сама функция работает следующим образом (рис. 4), в плоскости перпендикулярной двум исходным точкам ( $p_1, p_2$ ) строится точка на расстоянии  $r_{12}$ , которое выбирается случайно (1). Положение самой плоскости также случайно относительно середины отрезка  $p_2 p_1$ . Далее происходит рекурсия с точками ( $p_1, p_{12}$  и  $p_{12}, p_2$ ).

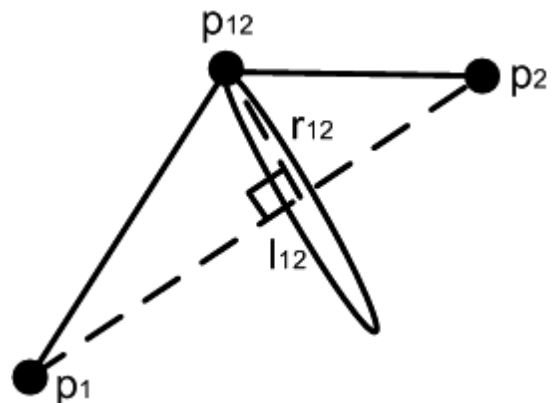


Рис. 4 – Иллюстрация рекурсивной процедуры разбиения

К каждому сегменту сосуда присваивается определенное значение диаметра ( $d$ ), путем случайного выбора из типичных для сосуда диаметров (1). Вдоль сегмента сосуда, строится объем путем аппроксимации сегмента сосуда цилиндром (3):

$$V = \pi \int_0^l \frac{d^2}{4} dx. \quad (2)$$

На заключительном этапе, осуществляется rasterization пространственной модели в набор вокселей, благодаря чему полученные данные можно использовать в качестве исходного объема для тренировки нейрохирургов.

### Обсуждение результатов

В результате, с участием используемого метода построен участок сосуда с малой рекурсией (рис. 5 а) и большей (рис. 5 б).

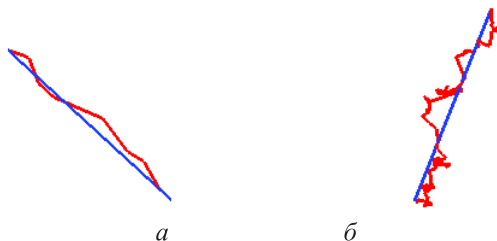


Рис. 5 – Иллюстрация построения «скелета» с использованием процедуры рекурсивного разбиения

Как видно из рис.5, используемые параметры ориентации, а также мест разбиения являются не подходящими, ввиду разного количества пересечения исходного сегмента поддающегося разбиению. Поэтому для более точного воспроизведения моделей, следует использовать данные цифровой вычитательной ангиографии, совместно с методами машинного обучения.

В то же время, используемый подход позволяет использовать данный скелет при тестировании как системы планирования нейрохирургических вмешательств.

В последующем, следует осуществить реконструкцию не одного участка сосуда, а всего графа кровеносного русла головного мозга.

### Выводы

В ходе исследования рассмотрено анатомическое строение сосудистой системы головного мозга, с точки зрения возможности её трехмерной параметрической реконструкции; сформированы принципы описания такой модели с использованием графа, а также трехмерного математического аппарата; определены этапы построения такой модели.

Разработанный метод построения трехмерной модели кровеносной системы головного мозга является важной составляющей при обеспечении тренинга нейрохирургов. Этот подход, кроме возможности симулирования различных отклонений строения кровеносной системы, не требует реальных томографических данных, а, следовательно, полностью соответствует требованиям медицинской этики.

Следующим шагом является получение данных для построения полной трехмерной модели кровеносного русла.

В будущем, данный подход, вместе с предоперационным планированием, а также технологиями трехмерной печати должен обеспечить виртуальное обучение проведения хирургического вмешательства.

### Список литературы

- 1 **Hou, B. L.** Quantitative comparisons on hand motor functional areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors / **B. L. Hou, S. Bhatia, J. S. Carpenter** // *NeuroImage: Clinical.* – 2016. – № 11. – P. 378-387. – doi: 10.1016/j.nicl.2016.03.003.
- 2 **Тымкович, М. Ю.** Способ реконструкции интактной поверхности хирургических доступов / **М. Ю. Тымкович, О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2014. – V. 4. – №9 (70). – С. 37-41.
- 3 **Kettenbach, J.** Computer-based imaging and interventional MRI applications for neurosurgery / **J. Kettenbach, T. Wong, D. Kacher, N. Hata, R. B. Schwartz, P. Black, R. Kikinis, F. A. Jolesz** // *Computerized Medical Imaging and Graphics.* – 1999. – № 23. – P. 245-258.
- 4 **Martinez-Ramirez, D.** Update on deep brain stimulation in Parkinson's disease / **D. Martinez-Ramirez, W. Hu, A. R. Bona, M. S. Okun, A. W. Shukla** // *Translational Neurodegeneration.* – 2015. – P. 4-12. – doi: 10.1186/s40035-015-0034-0.
- 5 **Gee, L. E.** Subthalamic deep brain stimulation alters neuronal firing in canonical pain nuclei in a 6-hydroxydopamine lesioned rat model of Parkinson's disease / **L. E. Gee, I. Walling, A. Ramirez-Zamora, D. S. Shin, J. G. Pilitsis** // *Experimental Neurology.* – V. 283. – 2016. – P. 298-307. – doi: 10.1016/j.expneurol.2016.06.031.
- 6 **Qiu, M. H.** Deep brain stimulation in the globus pallidus externa promotes sleep / **M. H. Qiu, M. C. Chen, J. Wu, D. Nelson, J. Lu** // *Neuroscience.* – V. 322. – 2016. – P. 115-120. – doi: 10.1016/j.neuroscience.2016.02.032.
- 7 **Ramirez-Zamora, A.** Hyperhidrosis associated with subthalamic deep brain stimulation in Parkinson's disease: Insights into central autonomic functional anatomy / **A. Ramirez-Zamora, H. Smith, Y. Youn, J. Durphy, D. S. Shin, J. G. Pilitsis** // *Journal of the Neurosurgical Sciences.* – V. 366. – 2016. – P. 59-64. – doi: 10.1016/j.jns.2016.04.045.
- 8 **Trope, M.** The role of automatic computer-aided surgical trajectory planning in improving the expected safety of stereotactic neurosurgery / **M. Trope, R. R. Shamir, L. Joskowicz, Z. Medress, G. Rosenthal, A. Mayer, N. Levin, A. Bick, Y. Shoshan** // *Int J CARS.* – 2014. – P. 1127-1140. – doi: 10.1007/s11548-014-1126-5.

- 9 **Nowell, M.** Comparison of computer-assisted and manual planning for depth electrode implantations in epilepsy / **M. Nowell, R. Sparks, G. Zombori, A. Miserocchi, R. Rodionov, B. Diehl, T. Wehner, G. Baio, G. Trevisi, M. Tisdall, S. Ourselin, A. W. McEvoy, J. Duncan** // *J Neurosurg.* – 2015. – 124(6). – P. 1-9. – doi: 10.3171/2015.6.JNS15487.
- 10 **Cardinale, F.** Cerebral Angiography for Multimodal Surgical Planning in Epilepsy Surgery: Description of a New Three-Dimensional Technique and Literature Review / **F. Cardinale, G. Pero, L. Quilici, M. Piano, P. Colombo, A. Moscato, L. Castana, G. Casaceli, D. Fushillo, L. Gennari, M. Cenzato, G. L. Russo, M. Cossu** // *World Neurosurgery.* – 2015. – 84(2). – P. 1-10. – doi: 10.1016/j.wneu.2015.03.028.
- 11 **Fujii, T.** Neuropath planner-automatic path searching for neurosurgery / **T. Fujii, H. Emoto, N. Sugou, T. Mito, I. Shibata** // *International Congress Series.* – 2003. – V. 1256. – P. 587-596. – doi: 10.1016/S0531-5131(03)00363-7.
- 12 **Zelmann, R.** Improving recorded volume in mesial temporal lobe by optimizing stereotactic intracranial electrode implantation planning / **R. Zelmann, S. Beriault, M. M. Marinho, K. Mok, J. A. Hall, N. Guizard, C. Haegelen, A. Olivier, G. B. Pike, D. L. Collins** // *Int J CARS.* – 2015. – 10(10). – 1599-615. – doi: 10.1007/s11548-015-1165-6.
- 13 **Tomasello, F.** 3D printing in Neurosurgery / **F. Tomasello, A. Conti, D. L. Torre** // *World Neurosurgery.* – 2016. – 91. – P. 633-634. – doi: 10.1016/j.wneu.2016.04.034.
- 14 **Waran, V.** Injecting Realism in Surgical Training – Initial Simulation Experience With Custom 3D Models / **V. Waran, V. Narayanan, R. Karuppiah, D. Pancharatnam, H. Chandran, R. Raman, Z. Ariff, A. Rahman, S. L. F. Owen, T. Z. Aziz** // *Journal of Surgical Education.* – 2013. – 71(2). – P. 193-197. – doi:10.1016/j.jsurg.2013.08.010.
- 15 **Lan, Q.** Development of 3D Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery / **Q. Lan, A. Chen, T. Zhang, G. Li, Q. Zhu, X. Fan, C. Ma, T. Xu** // *World Neurosurgery.* – 2016. – 91. – P. 434-442. – doi:10.1016/j.wneu.2016.04.069.
- 16 **Malik, H. H.** Three-Dimensional Printing In Surgery: A Review Of Current Surgical Applications / **H. H. Malik, A. R. J. Darwood, S. Shaunak, P. Kulatilake, A. A. El-Hilly, O. Mulki, A. Baskaradas** // *Journal of Surgical Research.* – 2015. – 199(2). – 512-522. – doi:10.1016/j.jss.2015.06.051.
- 17 **Аврунин, О. Г.** Определение степени инвазивности хирургического доступа при компьютерном планировании оперативных вмешательств / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович, Х. И. Фарук** // *Бионика интеллекта.* – 2013. – Вып. 2 (81). – С. 101-104.
- 18 **Аврунин, О. Г.** Оптимизация нейрохирургических доступов с использованием цифрового атласа внутримозговых структур / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович** // *Вестник НТУ "ХПИ" Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 39 (1148). – С. 63-67.
- 19 **Gutierrez, J.** A quantitative perspective to the study of brain arterial remodeling of donors with and without HIV in the Brain Arterial Remodeling Study (BARS) / **J. Gutierrez, G. Rosoklija, J. Murray, C. Chon, M. S. V. Elkind, J. Goldman, L. S. Honig, A. J. Dwork, S. Morgello, R. S. Marshall** // *Frontiers in physiology.* – 2014. – V. 5. – P. 1-11. – doi:10.3389/fphys.2014.00056.
- 20 **Srinivasan, V. M.** Application of 4D-DSA for Dural Arteriovenous Fistulas / **V. M. Srinivasan, G. Chintalapani, E. A. M. Duckworth, P. Kan** // *World Neurosurgery.* – 2016. – doi:10.1016/j.wneu.2016.05.021.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Hou, B. L., Bhatia, S., Carpenter, J. S.** Quantitative comparisons on hand motor functional areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors. *NeuroImage: Clinical*, 2016, **11**, 378-387, doi: 10.1016/j.nicl.2016.03.003.
- 2 **Tymkovich, M. Y., Avrunin, O. G., Farouk, H. I.** Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, **9(70)**, 37-41.
- 3 **Kettenbach, J., Wong, T., Kacher, D., Hata, N., Schwartz, R. B., Black, P., Kikinis, R., Jolesz, F. A.** Computer-based imaging and interventional MRI applications for neurosurgery. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 1999, **23**, 245-258.
- 4 **Martinez-Ramirez, D., Hu, W., Bona, A. R., Okun, M. S., Shukla, A. W.** Update on deep brain stimulation in Parkinson's disease. *Translational Neurodegeneration*, 2015, 4-12, doi: 10.1186/s40035-015-0034-0.
- 5 **Gee, L. E., Walling, I., Ramirez-Zamora, A., Shin, D. S., Pilitsis, J. G.** Subthalamic deep brain stimulation alters neuronal firing in canonical pain nuclei in a 6-hydroxydopamine lesioned rat model of Parkinson's disease. *Experimental Neurology*, 2016, **283**, 298-307, doi: 10.1016/j.expneurol.2016.06.031.
- 6 **Qiu, M. H., Chen, M. C., Wu, J., Nelson, D., Lu, J.** Deep brain stimulation in the globus pallidus externa promotes sleep. *Neuroscience*, 2016, **322**, 115-120, doi: 10.1016/j.neuroscience.2016.02.032.
- 7 **Ramirez-Zamora, A., Smith, H., Youn, Y., Durphy, J., Shin, D. S., Pilitsis, J. G.** Hyperhidrosis associated with subthalamic deep brain stimulation in Parkinson's disease: Insights into central autonomic functional anatomy. *Journal of the Neurosurgical Sciences*, **366**, 59-64, doi: 10.1016/j.jns.2016.04.045.
- 8 **Trope, M., Shamir, R. R., Joscowicz, L., Medress, Z., Rosenthal, G., Mayer, A., Levin, N., Bick, A., Shoshan, Y.** The role of automatic computer-aided surgical trajectory planning in improving the expected safety of stereotactic neurosurgery. *Int J CARS*, 1127-1140, doi: 10.1007/s11548-014-1126-5.
- 9 **Nowell, M., Sparks, R., Zombori, G., Miserocchi, A., Rodionov, R., Diehl, B., Wehner, T., Baio, G., Trevisi, G., Tisdall, M., Ourselin, S., McEvoy, A. W., Duncan, J.** Comparison of computer-assisted and manual planning for depth electrode implantations in epilepsy. *J Neurosurg*, 2015, **124(6)**, 1-9, doi: 10.3171/2015.6.JNS15487.
- 10 **Cardinale, F., Pero, G., Quilici, L., Piano, M., Colombo, P., Moscato, A., Castana, L., Casaceli, G., Fushillo, D., Gennari, L., Cenzato, M., Russo, G. L., Cossu, M.** Cerebral Angiography for Multimodal Surgical Planning in Epilepsy Surgery: Description of a New Three-Dimensional Technique and Literature Review. *World Neurosurgery*, 2015, **84(2)**, 1-10, doi: 10.1016/j.wneu.2015.03.028.
- 11 **Fujii, T., Emoto, H., Sugou, N., Mito, T., Shibata, I.** Neuropath planner-automatic path searching for neurosurgery. *International Congress Series*, 2003, **1256**, 587-596, doi: 10.1016/S0531-5131(03)00363-7.

- 12 **Zelmann, R., Berialt, S., Marinho, M. M., Mok, K., Hall, J. A., Guizard, N., Haegelen, C., Olivier, A., Pike, G. B., Collins, D. L.** Improving recorded volume in mesial temporal lobe by optimizing stereotactic intracranial electrode implantation planning. *Int J CARS*, 2015, **10**(10), 1599-615, doi: 10.1007/s11548-015-1165-6.
- 13 **Tomasello, F., Conti, A., Torre, D. L.** 3D printing in Neurosurgery. *World Neurosurgery*, 2016, **91**, 633-634, doi: 10.1016/j.wneu.2016.04.034.
- 14 **Waran, V., Narayanan, V., Karuppiah, R., Pancharatnam, D., Chandran, H., Raman, R., Ariff, Z., Rahman, A., Owen, S. L. F., Aziz, T. Z.** Injecting Realism in Surgical Training – Initial Simulation Experience With Custom 3D Models. *Journal of Surgical Education*, 2013, **71**(2), 193-197, doi:10.1016/j.jsurg.2013.08.010.
- 15 **Lan, Q., Chen, A., Zhang, T., Li, G., Zhu, Q., Fan, X., Ma, C., Xu, T.** Development of 3D Printed Craniocerebral Models for Simulated Neurosurgery. *World Neurosurgery*, 2016, **91**, 434-442, doi:10.1016/j.wneu.2016.04.069.
- 16 **Malik, H. H., Darwood, A. R. J., Shaunak, S., Kulatilake, P., El-Hilly, A. A., Mulki, O., Baskaradas, A.** Three-Dimensional Printing In Surgery: A Review Of Current Surgical Applications. *Journal of Surgical Research*, 2015, **199**(2), 512-522, doi:10.1016/j.jss.2015.06.051.
- 17 **Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., Farouk, H. I.** Determining the degree of invasiveness of surgical access for planning surgery. *Bionics of Intelligence*, 2013, **2**(81), 101-104.
- 18 **Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y.** Optimization of Neurosurgical Access Using the Digital Atlas of Intracerebral Structures. *Vesnik NTU "KhPI": New solutions in modern technologies*, 2015, **39**(1148), 63-67.
- 19 **Gutierrez, J., Rosoklija, G., Murray, J., Chon, C., Elkind, M. S. V., Goldman, J., Honig, L. S., Dwork, A. J., Morgello, S., Marshall, R. S.** A quantitative perspective to the study of brain arterial remodeling of donors with and without HIV in the Brain Arterial Remodeling Study (BARS). *Frontiers in physiology*, 2014, **5**, 1-11, doi:10.3389/fphys.2014.00056.
- 20 **Srinivasan, V. M., Chintalapani, G., Duckworth, E. A. M., Kan, P.** Application of 4D-DSA for Dural Arteriovenous Fistulas. *World Neurosurgery*, 2016, doi:10.1016/j.wneu.2016.05.021.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Аврунин Олег Григорьевич** – д.т.н., проф., кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: gavrun@list.ru.

**Avrunin Oleg** – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: gavrun@list.ru.

**Тымкович Максим Юрьевич** – асс, кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: maxim\_tymkovich@ukr.net.

**Tymkovych Maksym** – Teaching Assistant, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: maxim\_tymkovich@ukr.net.

**Бых Анатолий Иванович** – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. кафедра Биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

**Bykh Anatoliy** – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bykh@kture.kharkov.ua.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

**Аврунин, О. Г.** Построение трехмерной модели кровеносной системы головного мозга для задач планирования и тренировки проведения нейрохирургических вмешательств / **О. Г. Аврунин, М. Ю. Тымкович, А. И. Бых** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 11-17. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

Please cite this article as:

**Avrunin, O., Tymkovych, M., Bykh, A.** Construction of Three-Dimensional Model of Circulatory System of the brain for Planning and Training of Neurosurgical Interventions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 11-17, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Аврунін О. Г.** Побудова тривимірної моделі кровеносної системи головного мозку для задач планування і тренування проведення нейрохірургічних втручань / **О. Г. Аврунін, М. Ю. Тимкович, А. І. Бых** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 11-17. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.02.

**АНОТАЦІЯ** Робота присвячена побудові тривимірної моделі кровеносної системи головного мозку людини, для задач планування і тренування проведення нейрохірургічних втручань. Запропоновано основні етапи, що забезпечують побудову тривимірної моделі на основі параметричних даних, а також її математичного опису. Показана можливість використання розробленого підходу для забезпечення навчання проведення нейрохірургічного віртуального втручання, а в майбутньому, з використанням швидкого 3d прототипування, і реального.

**Ключові слова:** кровеносна система, моделювання, мозок, операція, нейрохірургія, планування.

Поступила (received) 04.07.2016



УДК 615.47: 616–072.7

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.03

## ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПОДМАСОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИ РИНОМАНОМЕТРИИ

**О. Г. АВРУНИН, Х. И. ФАРУК, Т. С. КОНОНЕНКО**

*Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА  
email: gavrur@list.ru*

**АННОТАЦИЯ** В работе рассматриваются возможности косвенного определения давления в подмасочном пространстве при проведении риноманометрии. Предлагается метод расчетного определения давления на входе в носовую полость на основе экспериментальных исследований потерь давления в риноманометре. Результаты проведенных исследований показывают, что для конкретной модели риноманометра возможен отказ от преобразователя давления, расположенного во внутримасочном пространстве, и определение аэродинамического сопротивления устройства расчетным путем или по результатам аэродинамических испытаний. Полученные значения коэффициента потерь и зоны его уверенного применения должны указываться в паспорте прибора. Рассчитываемый разброс значений давлений составил порядка 12%, что соизмеримо с погрешностью используемых преобразователей давления. При практическом использовании метода расчетного определения давления во внутримасочном пространстве необходимо проводить учет изменения плотности воздуха от температуры, что будет способствовать снижению погрешности расчетов.

**Ключевые слова:** риноманометрия, давление, расход воздуха, носовая полость, носовое дыхание

## POSSIBILITIES OF PRESSURE DETERMINATION IN INTERNAL MASK AREA AT RHINOMANOMETRY

**O. AVRUNIN, H. FARUK, T. KONONENKO**

*Department of biomedical engineering, Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** This work is devoted the possibility of indirectly determining the pressure in the internal mask area in rhinomanometrical devices. Modern computer Rhinomanometry are complex electronic devices through the use of miniature pressure transducers and airflow and allows, due to the specialized software, get a graph of the parameters of airflow in the nasal cavity. However, the main problem in creating Rhinomanometry is the selection and placement of appropriate transducers, on the reliability of the testimony of which is primarily dependent on the accuracy of the diagnosis. Proposed method of calculation of the pressure at the entrance to the nasal cavity by experimental studies rhinomanometry pressure losses. The results of these studies show that a particular model Rhinomanometry possible failure of the pressure transducer located in internal mask area, and determining the aerodynamic resistance of the device by calculation or on the results of aerodynamic tests. The resulting values of the loss factor and his confident use of the zone must be specified in the device data sheet. Calculated values of the pressure variation was about 12%, which is comparable with the accuracy of the pressure transducers used. In practical use of the method of calculation of the pressure in the internal mask area should be carried out keeping the air density changes with temperature that will reduce calculation errors. Perspective of the work is improving the design of prototypes rhinomanometry type TNDA and development of practical recommendations for the design of devices for the testing of nasal breathing.

**Keywords:** rhinomanometry, pressure, air flow, nasal cavity, nasal breathing

### Введение

В настоящее время одной из наиболее актуальных социальных проблем во всех индустриально развитых странах мира является разработка и внедрение новых медицинских технологий для повышения качества оказания медицинской помощи, что подтверждается, в частности, приоритетными направлениями Рамочной программы Европейского Союза «Horizon 2020» Program EU “Horizon 2020/H2020”) [1] Применение современных информационных технологий при разработке медицинских приборов позволяет существенно увеличить достоверность качество предоставляемой диагностической и повысить эффективность лечения различных патологий [2]. При этом надо учитывать, что к современным

доказательным методам функциональной диагностики предъявляются требования высокой достоверности и повторяемости результатов измерений физиологических показателей [3].

### Актуальность

В последние десятилетия во всех развитых странах мира отмечен существенный рост распространенности заболеваний верхних дыхательных путей, при которых наиболее часто нарушается дыхательная функция носа, что приводит к снижению качества жизни пациента и, в последствии, к расстройствам центральной нервной системы, сердечно-сосудистым патологиям и т.д. [2-4]. Эффективность терапии при этом существенно зависит от качества диагностики, исходя из

© О. Г. АВРУНИН, Х. И. ФАРУК, Т. С. КОНОНЕНКО, 2016

результатов которой, проводится выбор адекватной лечебной тактики [3, 4]. Поэтому в современной ринологии на первый план выходят задачи совершенствования доказательных методов тестирования носового дыхания и расширение диагностических возможностей диагностической аппаратуры.

#### Анализ литературных данных и постановка задачи

В настоящее время наиболее распространенным инструментальным методом оценки функции носового дыхания является риноманометрия, при проведении которой выполняются измерения внутриносового перепада давления  $\Delta p$  и соответствующего расхода  $Q$  воздуха, проходящего через нос [3-5]. Основным диагностическим показателем при этом является величина аэродинамического носового сопротивления, выражаемая отношением перепада давления на носовой полости к величине соответствующего объемного расхода воздуха. Современные компьютерные риноманометры представляют собой сложные электронные устройства на основе использования миниатюрных преобразователей давления и скорости воздушного потока и позволяющие, за счет специализированного программного обеспечения, получить графические зависимости параметров воздушного потока в полости носа. Тем не менее, основной проблемой при создании риноманометров является выбор и размещение соответствующих измерительных преобразователей, от надежности показаний которых в первую очередь зависит достоверность диагностики.

По расположению измерительных преобразователей методы риноманометрии разделяются на, так называемые, передние и задние [4-8]. Различие данных методов заключается в том, что в соответствии с законом Паскаля при передней риноманометрии измеряется дифференциальное давление на уровне хоан, а при задней – в носоглотке.

В первом случае измерение перепада хоанального давления проводится с помощью воздуховодной трубки с обтюратором, герметично устанавливаемом в противоположной исследуемой половине носа. Главным недостатком этого метода является нефизиологичность дыхания, осуществляемого поочередно через каждую половину носа и, как следствие, искажение результатов измерений, из-за рефлекторного изменения объема слизистой оболочки носовой полости.

Во втором случае происходит измерение давления в носоглотке с помощью воздуховодной трубки, дистальная оконечность которой располагается во рту пациента при плотно зажатых губах. Для осуществления этого способа от пациента требуется некоторое привыкание к осуществлению дыхательных маневров и отсутствие рвотного рефлекса, что особенно актуально при обследовании

детей [4, 9]. Исключая особенности этих методов и исходя из схемы размещения измерительных преобразователей при задней риноманометрии, приведенной на рисунке 1, в диагностических целях необходимо получить величину перепада давления на носовой полости, определяемую как

$$\Delta p_n = p_2 - p_3 \quad (1)$$

где  $p_2$  и  $p_3$  – величины давлений в носоглотке и подмасочном пространстве, соответственно ( $p_1$  – давление, измеряемое для определения расхода воздуха согласно рис.1). Учитывая, что аэродинамическое сопротивление входного воздушного тракта риноманометра зависит только от его конструктивных особенностей, то величину давления  $p_3$  можно не измерять непосредственно, а вычислять в зависимости от пропускаемого расхода воздуха, что позволит упростить конструкцию устройства, за счет исключения из схемы соответствующего измерительного преобразователя.

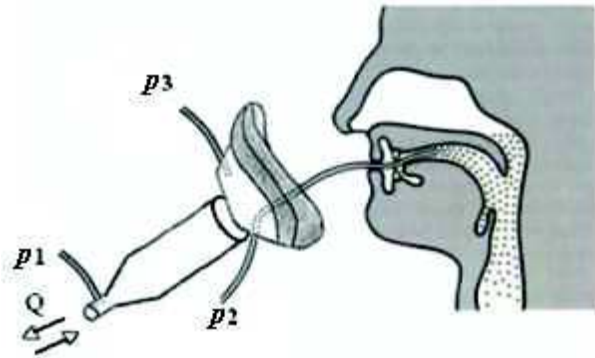


Рис. 1 – Схема размещения измерительных преобразователей давления при задней активной риноманометрии

#### Цель работы

Таким образом, целью работы является разработка метода косвенного определения перепада давления в подмасочном пространстве при проведении риноманометрии, исключающего применение дополнительного датчика давления на входе в носовую полость.

#### Расчет потерь давления в воздушном тракте риноманометра

Основными параметрами для расчета потерь давления на местных сопротивлениях и по длине воздушного канала являются:

– скорость течения воздуха [10]

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход воздуха,  $S$  – площадь сечения трубопровода (характерного участка трубопровода),  $d$  – диаметр характерного участка трубопровода, мм;  
– число Рейнольдса  $Re$ , определяющее характер течения воздуха (ламинарный или турбулентный)

$$Re = \frac{V \cdot d_{\Gamma}}{\nu}, \quad (3)$$

где  $d_{\Gamma}$  – гидравлический диаметр трубопровода, определяемый как

$$d_{\Gamma} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь сечения трубопровода,  $\Pi$  – периметр сечения трубопровода,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха. Для цилиндрических отверстий и труб гидравлический диаметр равен диаметру отверстия или трубы.

Перепад давлений (потери давления) при течении воздуха определяют:

– через величину местного сопротивления по формуле Вейсбаха [10, 11]

$$\Delta p_{\text{м.с}} = \xi_{\text{м.с}} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (5)$$

где  $\xi_{\text{м.с}}$  – коэффициент местного сопротивления, зависящий от конфигурации сопротивления (значения коэффициента местного сопротивления приведены в соответствующих справочниках по гидравлическим расчетам, или определяются экспериментально),  $V$  – средняя скорость воздуха в сечении, расположенном за данным сопротивлением,  $\rho$  – плотность воздуха;

Потери по длине воздушного тракта (трубопровода) по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\Delta p_L = \lambda \cdot \rho \cdot \frac{L V^2}{d}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – безразмерный коэффициент гидравлического трения,  $L$  – длина трубопровода.

Расчет потерь давления проведем на примере воздушного тракта компьютерного риноманометра – устройства для тестирования носового дыхания ТНДА с блоком измерения перепадно-расходных характеристик ПРХ производства ХНУРЕ (свидетельство о государственной метрологической аттестации устройства ПРХ, № 05-0102 от 01.04.2010 г.). Схема воздушного тракта устройства ТНДА представлена на рисунке 2, на которой обозначены четыре специфических сечения:

– 1-1 – сечение в самом узком месте «сопла Вентури» диаметром  $d$ , давление  $p_1$  (см. рис. 1) в котором определяется с помощью преобразователя давления ПД1;

– 2-2 – сечение диаметром  $D$  в самом широком участке трубопровода, которое является конечным участком конуса (диффузора) длиной  $L_d$ ;

– 3-3 – сечение диаметром  $D$ , которым завершается прямолинейный участок трубопровода длиной  $L_{\text{пр}}$  (участок от 2-2 до 3-3);

– 4-4 – сечение диаметром  $D_p$ , характеризующее сопротивление типа «внезапное расширение потока» по отношению к сечению 3-3. Давление  $p_3$  (см. рис. 1) в сечении 4-4 измеряют с помощью преобразователя ПД3.

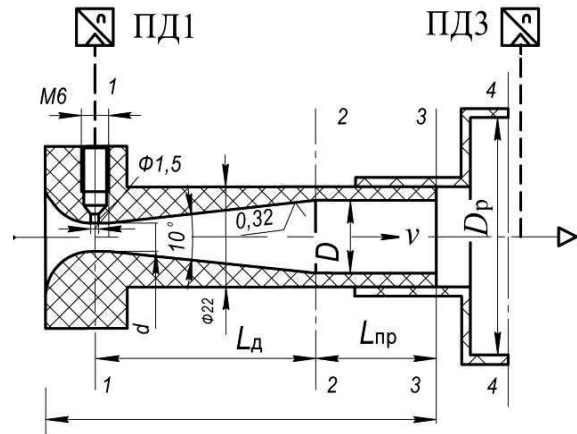


Рис. 2 – Схема воздушного тракта компьютерного риноманометра ТНДА с обозначениями для определения коэффициента сопротивления воздушному потоку

Коэффициенты сопротивления рекомендуется определять по формулам:

– на коническом участке 1-1 – 2-2 потери в диффузоре зависят от угла конусности и длины участка [11]

$$\xi_{\Sigma} = k_{\text{н.р}} \left( \frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2 + \frac{\lambda_{\text{ср}}}{8 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2}} \cdot \left[ \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 - 1 \right], \quad (7)$$

где  $k_{\text{н.р}}$  – коэффициент смягчения при постепенном расширении,  $\alpha$  – угол конусности,  $S_1$  и  $S_2$  – площади сечений конуса диаметрами  $d$  и  $D$ ,  $\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$  –

коэффициент сопротивления по длине конуса, определяемый как среднее значение коэффициентов сопротивления по длине для узкой  $\lambda_1$  и широкой  $\lambda_2$  частей конуса;

– на участке 2-2 – 3-3 потери давления определяются как потери по длине, например, по универсальной формуле А.Д. Альтшуля [11]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_z}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубопровода,  $k_z$  – эквивалентная абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода, значение которой в зависимости от материала.

– на участке 3-3 – 4-4 коэффициент сопротивления определяют по формуле Борда [10-11]

$$\xi_{\text{вн.р}} = \left( \frac{S_{D_p}}{S_D} - 1 \right)^2, \quad (9)$$

где  $S_{D_p}$  и  $S_D$  – площади сечений с диаметрами  $D_p$  и  $D$ , соответственно.

Расчетные формулы, приведенные в различных справочниках, находят применение, как правило, для таких объектов, которые не подвергаются экспериментальной проверке, например, водоводы турбин гидроэлектростанций, каналы, русла рек и др. Для устройств относительно небольших размеров, к которым относится и компьютерный риноманометр ТНДА, целесообразно проводить экспериментальные исследования (так называемую, продувку) и определить действительный перепад давлений (уровень потерь).

Для расчетного определения давления  $p_3$  запишем общий перепад давлений на сопротивлениях устройства ТНДА в виде

$$\Delta p = p_1 - p_3, \quad (10)$$

и представим зависимость перепада давлений от расхода в следующей форме записи

$$\Delta p = p_1 - p_3 = \xi_{\Sigma} \cdot \rho \cdot Q^2, \quad (11)$$

где  $\xi_{\Sigma}$  – общий (суммарный) коэффициент гидравлического сопротивления воздушного тракта устройства ТНДА

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{\text{м.с}} + \lambda, \quad (12)$$

где  $\xi$  и  $\lambda$  – коэффициенты местных сопротивлений и сопротивлений по длине, соответственно.

Если известен коэффициент  $\xi_{\Sigma}$ , то величину давления  $p_3$  можно рассчитать по формуле

$$p_3 = p_1 - \xi_{\Sigma} \cdot \rho \cdot Q^2. \quad (13)$$

Для оценки правомерности такого подхода (вычисления давления  $p_3$  расчетным путем) значение коэффициента  $\xi_{\Sigma}$  находим предварительно по результатам экспериментальной продувки устройства ТНДА на различных расходных режимах пропускаемого воздуха, где фиксируемыми параметрами являются расход  $Q$ , плотность воздуха  $\rho$ , давления  $p_1$  и  $p_3$ .

В таблице 1 приведены результаты измерений и расчета параметров устройства ТНДА, необходимые для дальнейшего анализа. Объектом исследований служило устройство ТНДА со следующими геометрическими характеристиками:  $d = 7$  мм;  $D = 16$  мм;  $L_{\text{д}} = 50$  мм;  $L_{\text{тр}} = 20$  мм;  $D_p = 40$  мм и плотностью воздуха  $\rho = 1$  кг/м<sup>3</sup>. Скорость потока воздуха  $V$  и число Re определялись в сечении 2-2.

При проведении испытаний анализировались режимы течения воздуха с различным расходом от 0,6 до 3 л/с, которые сопровождались колебательным характером, специфичным для дыхания человека. Анализ полученных результатов показывает, что в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 8300 \dots 16200$ , что соответствует расходам воздуха от 1,6 до 3,2 л/с [12], значение коэффициента сопротивления находится в узком диапазоне  $\xi_{\Sigma} = 0,36 \dots 0,41$ , а с уменьшением числа  $Re$  менее 7400 наблюдается снижение коэффициента сопротивления до  $\xi_{\Sigma} = 0,35 \dots 0,2$ .

Следует также подчеркнуть, что значения коэффициента  $\xi_{\Sigma}$ , в зависимости от вида сопротивления, могут существенно изменяться, в частности, при использовании расходомера типа «сопло Вентури» диаметром  $d = 9,3$  мм и постоянном расходе порядка 2 л/с, могут быть получены расчетным путем следующие данные:

– для потерь по длине на участках до 50 мм коэффициент сопротивления не превышает  $\xi_{\Sigma} = 0,01$ ;

– с дроссельным сопротивлением  $d_{\text{др}} = 8,5$  мм  $\xi_{\Sigma} = 0,26$ , а при уменьшении диаметра дросселя до  $d_{\text{др}} = 5,5$  мм наблюдается рост коэффициента сопротивления до  $\xi_{\Sigma} = 2,4$ , т.е. практически на порядок. Зависимость изменения коэффициента сопротивления  $\xi_{\Sigma}$  от диаметра дросселя  $d_{\text{др}}$  приведена на рисунке 3.

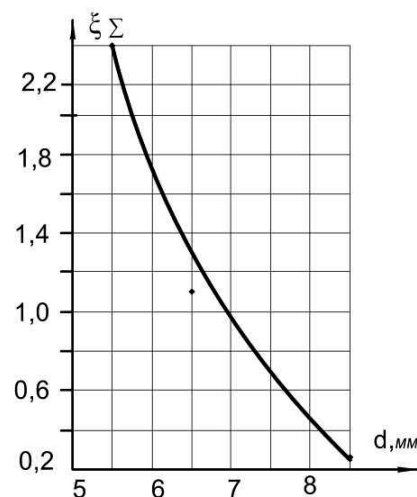


Рис. 3 – зависимость изменения коэффициента сопротивления  $\xi_{\Sigma}$  от диаметра дросселя  $d_{\text{др}}$ .

Таким образом, определив значение  $p_3$  последовательно по формулам (2-13)? можно вычислить перепад давления на носовой полости согласно выражению (1), практически, для любых моделей риноманометров с известными характеристиками воздушного тракта,

корреспондируя расчетные и экспериментальные данные.

Табл. 1 – Результаты измерений давлений и расчета расхода, скорости течения воздуха, числа Рейнольдса и суммарного коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{\Sigma}$  воздушного тракта испытываемого устройства ТНДА

| $p1$ ,<br>кПа | $p3$ ,<br>кПа | $\Delta p$ ,<br>кПа | $Q$ ,<br>л/с | $V$ ,<br>м/с | Re    | $\xi_{\Sigma}$ |
|---------------|---------------|---------------------|--------------|--------------|-------|----------------|
| 0,21          | 0,13          | 0,08                | 0,628        | 3,10         | 3221  | 0,202          |
| 0,45          | 0,21          | 0,24                | 0,919        | 4,55         | 4727  | 0,284          |
| 0,85          | 0,32          | 0,53                | 1,263        | 6,26         | 6504  | 0,332          |
| 1,10          | 0,38          | 0,72                | 1,437        | 7,12         | 7398  | 0,349          |
| 1,38          | 0,45          | 0,93                | 1,609        | 7,98         | 8291  | 0,359          |
| 1,72          | 0,53          | 1,19                | 1,797        | 8,91         | 9257  | 0,369          |
| 2,06          | 0,59          | 1,47                | 1,966        | 9,75         | 10130 | 0,380          |
| 2,23          | 0,58          | 1,65                | 2,046        | 10,15        | 10546 | 0,394          |
| 2,43          | 0,66          | 1,77                | 2,135        | 10,58        | 10993 | 0,388          |
| 2,80          | 0,72          | 2,08                | 2,29         | 11,36        | 11803 | 0,397          |
| 3,15          | 0,79          | 2,36                | 2,431        | 12,06        | 12530 | 0,399          |
| 3,50          | 0,84          | 2,66                | 2,563        | 12,71        | 13206 | 0,405          |
| 3,86          | 0,90          | 2,96                | 2,691        | 13,35        | 13871 | 0,409          |
| 4,46          | 1,02          | 3,44                | 2,890        | 14,3         | 14858 | 0,412          |
| 5,30          | 1,18          | 4,12                | 3,157        | 15,66        | 16271 | 0,413          |

### Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что для конкретной модели риноманометра (по диаметру входного отверстия маски и конфигурации воздушного тракта) возможен отказ от преобразователя давления ПДЗ и определение давления  $p3$  во внутримасочном пространстве косвенным (расчетным) путем по результатам аэродинамических испытаний конкретного прибора. В этом случае результаты продувки в виде коэффициента  $\xi_{\Sigma}$  и зоны его уверенного применения должны указываться в паспорте прибора. Рассчитываемый разброс значений давлений составляет порядка 12%, что соизмеримо с погрешностью используемых преобразователей давления ( $\pm 5\%$ , т.е. размах в 10%).

При практическом использовании метода расчетного определения давления во внутримасочном пространстве необходимо проводить учет изменения плотности воздуха от температуры, что будет способствовать снижению погрешности расчетов.

Перспективой работы является совершенствование конструкции опытных экземпляров риноманометров типа ТНДА и разработка практических рекомендаций при проектировании устройств для тестирования носового дыхания.

### Список литературы

- 1 Програма ЄС «Горизонт 2020» (Program EU “Horizon 2020/H2020”) – [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.khnu.km.ua/ROOT/dept/interdept/horizon-2020.pdf>. Загол. с экрана.
- 2 **Govidaraj, S.** Endoscopic sinus surgery: evolution and technical innovations / **S. Govidaraj** // *J. Laryngol. Otol.* – 2010. – № 24(3). – P. 242-250. – doi: 10.1017/S0022215109991368.
- 3 **Zhuravlev, A.** Rhinoseptoplasty, outcomes and perspectives / **A. Zhuravlev, M. Kalashnik, O. Avrunin et al.** // *Folia otorhinolaringologica.* – 2011. – Vol. 17. – № 3. – P. 8-12.
- 4 Руководство по ринологии / Под ред. **Г. З. Пискунова.** – М.: Луммеппа. – 2011. – 960 с.
- 5 **Cole, P.** Contemporary rhinomanometry / **P. Cole, R. Fenton** // *J Otolaryngol.* – 2006. – № 35(2). – P. 83-87.
- 6 **Fyrmpas, G.** The value of bilateral simultaneous nasal spirometry in the assessment of patients undergoing septoplasty / **G. Fyrmpas, D. Kyrmizakis, V. Vital, J. Constantinidis** // *Rhinology.* – 2011. – №49(3). – P. 297-303. – doi: 10.4193/Rhino10.199.
- 7 **Zhang, G.** Correlation between subjective assessment and objective measurement of nasal obstruction / **G. Zhang, R. Fenton, R. Rival et al.** // *Zhonghua.* – 2008. – №43(7). – P. 484-489.
- 8 **Zhang, G.** Nasal airway volume and resistance to airflow / **G. Zhang, P. Solomon, R. Rival et al.** // *Am. J. Rhinol.* – 2008. – № 22(4). – P. 371-375. – doi: 10.2500/ajr.2008.22.3187.
- 9 **Cole, P.** Anterior and posterior rhinomanometry / **P. Cole, A. Ayiomamitis, M. Ohki et al.** // *Rhinology.* – 1989. – № 27(4). – P. 257-62.
- 10 **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / **Л. Г. Лойцянский.** – М.: Наука. – 1970. – 904 с.
- 11 **Абрамов, Е. И.** Элементы гидропривода: Справочник / **Е. И. Абрамов, К. А. Колесниченко, В. Т. Маслов.** – Киев: Техніка. – 1977. – 320 с.
- 12 **Farouk, H.** Analysis of Changes of the Hydraulic Diameter and Determination of the Air Flow Modes in the Nasal Cavity / **H. Farouk, A. Khaleel, O. Avrunin** // *Advances in Intelligent and Soft Computing: Image Processing and Communications Challenges 3.* – Springer, 2011. – Vol. 102. – P. 303-310. – doi: 10.1007/978-3-642-23154-4\_34

### Bibliography (transliterated)

- 1 Program EU “Horizon 2020/H2020” – [Web]: <http://www.khnu.km.ua/ROOT/dept/interdept/horizon-2020.pdf>. Title screen.
- 2 **Govidaraj, S.** Endoscopic sinus surgery: evolution and technical innovations. *J. Laryngol. Otol.* 2010, 24(3), 242-250, doi: 10.1017/S0022215109991368.
- 3 **Zhuravlev, A., Kalashnik, M., Avrunin, O. et al.** Rhinoseptoplasty, outcomes and perspectives. *Folia otorhinolaringologica.* 2011, 17(3), 8-12.
- 4 Guide for rhinology / **Ed. G. Z. Piskunov.** *Moskow: Litera,* 2011, 960 p.
- 5 **Cole, P., Fenton, R.** Contemporary rhinomanometry. *J Otolaryngol,* 2006, 35(2), 83-87.
- 6 **Fyrmpas, G., Kyrmizakis, D., Vital, V., Constantinidis, J.** The value of bilateral simultaneous nasal spirometry in the assessment of patients undergoing septoplasty. *Rhinology.* 2011, 49(3), 297-303, doi: 10.4193/Rhino10.199.

- 7 **Zhang, G., Fenton, R., Rival, R. et al.** Correlation between subjective assessment and objective measurement of nasal obstruction. *Zhonghua*. 2008, **43**(7), 484-489.
- 8 **Zhang, G., Solomon, P., Rival, R. et al.** Nasal airway volume and resistance to airflow. *Am. J. Rhinol.* 2008, **22**(4), 371-375, doi: 10.2500/ajr.2008.22.3187.
- 9 **Cole, P., Ayiomamitis, A., Ohki, M. et al.** Anterior and posterior rhinomanometry. *Rhinology*. 1989, **27**(4), 257-62.
- 10 **Loyciansky L. G.** Mechanics of liquid and fluid. *Moscow: Science*, 1970, 904 p.
- 11 **Abramov, E. I., Kolesnichenko, K. A., Maslov, V. T.** Elements of the hydraulic drive: Manual. Kyiv: Technics, 1977, 320 p.
- 12 **Farouk, H., Khaleel, A., Avrunin, O.** Analysis of Changes of the Hydraulic Diameter and Determination of the Air Flow Modes in the Nasal Cavity. *Advances in Intelligent and Soft Computing: Image Processing and Communications Challenges 3*. – Springer, 2011, **102**, 303-310, doi: 10.1007/978-3-642-23154-4\_34.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Аврунин Олег Григорьевич** – д.т.н., проф., кафедра Биомедицинської інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків; e-mail: gavrun@list.ru.

**Avrunin Oleg** – Doctor of Science (Dr. Sc.), Professor, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: gavrun@list.ru.

**Фарук Хушам Исмаил** – аспірант, кафедра Биомедицинської інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: hushamfarouk@yahoo.com.

**Faruk Husham Ismail** – PhD-student, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: hushamfarouk@yahoo.com.

**Кононенко Татьяна Сергеевна** – аспірант, кафедра Биомедицинської інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: tanyusha.kononenko@mail.ru.

**Kononenko Tatyana Sergeevna** – PhD-student, Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail tanyusha.kononenko@mail.ru.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Аврунин, О. Г.** Возможности определения давления в подмасочном пространстве при риноманометрии / **О. Г. Аврунин, Х. И. Фарук, Т. С. Кононенко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 17-22. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.03.

*Please cite this article as:*

**Avrunin, O., Faruk, H., Kononenko, T.** Possibilities of pressure determination in internal mask area at rhinomanometry. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 17-22, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.03.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Аврунін О. Г.** Можливості визначення тиску у підмасковому просторі при риноманометрії / **О. Г. Аврунін, Х. И. Фарук, Т. С. Кононенко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 17-22. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.03.

**АНОТАЦІЯ** У роботі розглядається метод непрямого визначення тиску в внутрімасковому просторі при проведенні риноманометрії. Пропонується метод розрахункового визначення тиску на вході в носову порожнину на основі експериментальних досліджень втрат тиску при риноманометрії. Результати проведених досліджень показують, що для конкретної моделі риноманометра можлива відмова від використання перетворювача тиску, розташованого у внутрімасковому просторі, і визначення аеродинамічного опору пристрою розрахунковим шляхом, або за результатами аеродинамічних випробувань. Отримані значення коефіцієнта втрат і зони його введеного застосування повинні вказуватися в паспорті приладу. Помилка визначення значень тиску складе до 12%, що близько до похибки використовуваних перетворювачів тиску. При практичному використанні методу розрахункового визначення тиску у внутрімасковому просторі необхідно проводити облік зміни щільності повітря від температури, що буде сприяти зниженню похибки розрахунків.

**Ключові слова:** риноманометрія, тиск, витрата повітря, носова порожнина, носове дихання

*Поступила (received) 06.06.2016*

## ОЦЕНКА КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МАММОГРАФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СИМА И МАДИС

О. Н. БЕЗГИНОВА<sup>1</sup>, С. В. ЛИТВИНЕНКО<sup>2</sup>, О. И. РОМАНОВ<sup>2</sup>, Е. В. ХОМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «ЭЛКОМЕД», г. Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup>Фирма «РАДМИР» ДП АО НИИРИ, г. Харьков, УКРАИНА

\*email: khomenkoev@rambler.ru

**АННОТАЦИЯ** В данной работе описана уточненная методика оценки квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции для детекторов рентгеновского излучения цифровых маммографических комплексов СИМА и МАДИС. Эти детекторы построены по схеме: рентгено-люминесцентный экран – объектив – фоточувствительная ПЗС-матрица. Рассмотрены физико-технические условия формирования наборов входных данных программы оценки параметров маммографических комплексов СИМА и МАДИС. Приведены полученные для детекторов излучения серийно выпускаемых образцов маммографических комплексов СИМА и МАДИС графики зависимости квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции от пространственных частот.

**Ключевые слова:** цифровой маммографический комплекс, детектор рентгеновского излучения, квантовая эффективность регистрации, функция передачи модуляции, линейаризация, спектральная плотность шума.

## THE EVALUATION OF QUANTUM EFFICIENCY OF X-RAY DETECTORS FOR DIGITAL MAMMOGRAPHY SYSTEMS SYMA AND MADIS

O. BEZGINOVA<sup>1</sup>, S. LITVYNENKO<sup>2</sup>, O. ROMANOV<sup>2</sup>, E. KHOMENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«ELKOMED» LTD, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Radmir Company Subsidiary of Scientific Research Institute of Radio Engineering Measurements JSC, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** *The aim of work:* To develop a methodology to assess the quantum detection efficiency, and modulation transfer function for the X-ray detector, built by the scheme RLE - optics - PDCC-matrix. *The methods:* In paper describes a revised technique for evaluation of the detective quantum efficiency and modulation transfer function for X-ray detectors of digital mammography systems SYMA and MADIS. The detectors are assembled according to the scheme: X-ray luminescent screen – lens – photosensitive CCD. The physical and technical conditions of generating input data sets for the evaluation program of parameters for mammography systems SYMA and MADIS and the principle of operation of the systems were considered. *The results:* The detailed description of input data obtained by receiving X-ray images via X-ray detectors was given. This quantity of information allows making calculations of investigated dependencies with sufficient accuracy. Stages of the program algorithm for calculating the values of the detective quantum efficiency and modulation transfer function of the detectors were described. The diagrams that show dependencies of the detective quantum efficiency and modulation transfer function on spatial frequencies which were received for X-ray detectors of commercially available samples of mammography systems SYMA and MADIS were given. The quality characteristics which were received satisfy the requirements of normative documents for the X-ray detectors. *The conclusions:* The method of estimating the quantum detection efficiency, and modulation transfer function for the X-ray detector, built by the scheme RLE - optics - PDCC matrix. Such detectors are used in the production of mammography complexes Madis and SIM is described. The quality characteristics of radiation detectors mammography complexes SYMA and MADIS performance meet the requirements of regulatory documents to the X-ray detectors.

**Keywords:** digital mammography complex, X-ray detector, detective quantum efficiency, modulation transfer function, linearization, noise spectral density.

### Введение

В лечебно-профилактических учреждениях Украины за последние годы заметно возрос парк высокотехнологичного цифрового оборудования. Это относится и к цифровым рентгеновским маммографическим комплексам СИМА и МАДИС производства фирмы «Радмир» ДП АО НИИРИ (г. Харьков). Вместе с повышением количества используемых цифровых комплексов повышаются требования к оценке качества функционирования комплексов при их выпуске и эксплуатации.

Особенно это касается оценки параметров и характеристик качества формирования изображения цифровыми детекторами рентгеновского излучения. Главной характеристикой, определяющей качество работы детекторов, является зависимость квантовой эффективности регистрации (DQE) от пространственных частот и дозы рентгеновского излучения в плоскости детектора [1]. В настоящее время DQE единственная характеристика цифровых детекторов, требования к контролю которой задаются соответствующим международным стандартом EN 62220-1-2:2007 [2]. Этот стандарт гармонизирован в

Украине как ДСТУ EN 62220–1–2:2015 [3] и введен в действие с 1 января 2016 года. Методы оценки DQE, описанные в стандарте, носят обобщенный характер и требуют уточнения при работе с каждым конкретным типом детектора.

### Постановка задачи

Рентгеновские маммографические цифровые комплексы СИМА и МАДИС предназначены для рентгенографии молочной железы и визуализации рентгеновских изображений на экране монитора ПК при выполнении скрининговых и диагностических обследований. Они имеют идентичные детекторы рентгеновского излучения, собранные по схеме: рентгено-люминесцентный экран (РЛЭ) – объектив – фоточувствительная ПЗС-матрица (ФПЗС).

Принцип действия маммографических комплексов СИМА и МАДИС основан на просвечивании молочной железы рентгеновским излучением и преобразовании теневого рентгеновского изображения в оптический диапазон длин волн с помощью рентгено-люминесцентного экрана. Далее это изображение через оптическую систему проецируется на фотопреобразователь, выполненный на фоточувствительном приборе с зарядовой связью. Потенциальный рельеф изображения считывается с ФПЗС с последующим аналого-цифровым преобразованием в цифровой код, который передается в память ПК. С помощью ПК обеспечивается визуализация изображений на экране монитора, их архивирование и управление работой комплекса в целом.

Комплекс СИМА напольного типа имеет расстояние фокус-приемник 650 мм, а комплекс МАДИС настольного типа имеет расстояние фокус-приемник 210 мм. Общий вид комплексов СИМА и МАДИС приведен на рис. 1 и 2, соответственно.

Отметим, что примененная в цифровых детекторах комплексов технология построения с использованием ПЗС-матриц имеет ряд преимуществ перед твердотельными рентгеночувствительными панелями, а именно: устойчивость к быстрому изменению температуры окружающей среды, ремонтпригодность, относительно низкую стоимость [4-7]. В то же время энергетические потери в детекторах на ПЗС-матрицах компенсируются за счет применения так называемого микрофокусного способа получения фазоконтрастных рентгеновских изображений [8]. Этот способ предполагает работу рентгеновской трубки с размерами фокального пятна, не превышающими 0,1 мм, что и реализовано в комплексе МАДИС.

Рентгеновские снимки, получаемые с помощью детекторов рентгеновского излучения комплексов МАДИС и СИМА, представляют собой монохромные изображения форматом 3072×4096 элементов. Каждый файл снимка содержит двумерный массив 2-байтных элементов, содержащих информацию о

яркости пикселей. Массив элементов имеет заголовок, в котором хранятся данные о пациенте, визите, условиях получения снимка и т.д.



Рис. 1 – Общий вид КРМЦ СИМА



Рис. 2 – Общий вид КРМЦ МАДИС

Согласно [2] квантовая эффективность регистрации как функция пространственных частот может быть определена с использованием следующего выражения:

$$DQE(u, v) = G^2 MTF^2(u, v) \frac{W_{in}(u, v)}{W_{out}(u, v)}, \quad (1)$$

где:  $G$  – коэффициент усиления (передачи) приемного тракта в области нулевых пространственных частот;  $MTF(u, v)$  – функция передачи модуляции;  $W_{in}(u, v)$  – спектральная плотность квантовых шумов на входе каналов приемника;  $W_{out}(u, v)$  – спектральная плотность квантовых шумов на выходе каналов приемника.



Таким образом, процесс вычисления DQE может быть сведен к оценке составляющих элементов в представленном выражении. Для определения элементов необходимо рассмотреть вычислительные процедуры в применении их к детекторам рентгеновского излучения комплексов СИМА и МАДИС.

### Основная часть

Входящие в формулу (1) элементы – спектр мощности шума на выходе  $W_{out}(u, v)$  и функцию передачи модуляции  $MFT(u, v)$  детектора следует рассчитывать по линейаризованным данным, найденным из исходных данных с помощью обратной функции преобразования. Они выражаются числом квантов рентгеновского излучения, приходящихся на единицу площади. Источником исходных данных являются цифровые массивы снимков, полученные в детекторе изображения. Коэффициент усиления приемного тракта  $G$  является частью функции преобразования и не нуждается в отдельном определении. Тогда рабочей формулой для определения квантовой эффективности регистрации  $DQE(u, v)$  является зависимость:

$$DQE(u, v) = MTF^2(u, v) \frac{W_{in}(u, v)}{W_{out}(u, v)}. \quad (2)$$

Функцию преобразования необходимо определять по зарегистрированным при разных значениях дозы в плоскости детектора снимкам «чистого поля», т.е. при условии отсутствия входной плоскости каких-либо объектов.

Функция передачи модуляции описывает разрешающую способность детекторов. Эту характеристику определяют при воздействии рентгеновского излучения на специальные тест-объекты. Наиболее часто в качестве тест-объектов применяют пластины из нержавеющей стали с узкой щелью или острым краем. По ним определяется функция отклика детектора (LSF), из которой вычисляется функция MTF посредством применения преобразования Фурье.

Спектральная плотность квантового шума на входе детектора распределена равномерно по всей совокупности пространственных частот и определяется по формуле:

$$W_{in}(u, v) = K_a \cdot SNR_{in}^2, \quad (3)$$

где:  $K_a$  – измеренная экспозиционная доза в плоскости детектора, мкР;  $SNR_{in}^2$  – квадрат отношения сигнал-шум в дозе,  $1/\text{мм}^2\text{мкР}$ .

Спектральная плотность шума на выходе детектора определяется как:

$$W_{out}(u_n, v_k) = \frac{\Delta x \Delta y}{M \cdot 256 \cdot 256} \sum_{m=1}^M \left| \sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} (I(x_i, y_j) - S(x_i, y_j)) \exp(-2\pi i(u_n x_i + v_k y_j)) \right|^2, \quad (4)$$

где:  $\Delta x, \Delta y$  – размер пикселя в горизонтальном и вертикальном направлении, соответственно;  $M$  – количество областей интереса;  $I(x_i, y_j)$  – линейаризованные данные яркости элементов матрицы изображения;  $S(x_i, y_j)$  – двумерный полином, применяемый опционно для коррекции неоднородности радиационного поля.

Исходными данными для расчета спектральной плотности выходных шумов служат снимки «чистого поля», сделанные для заданного уровня дозы в плоскости детектора. Плоскость детектора условно делится на квадратные области интереса. Согласно [2] каждая область интереса должна иметь формат  $256 \times 256$  пикселей. Области интереса должны перекрываться на 128 пикселей в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 3). Первая область интереса должна находиться в верхнем левом углу изображения, вторая область интереса получается перемещением на 128 пикселей вправо в горизонтальном направлении и на половину перекрывает первую. Следующая область получается перемещением второй вновь на 128 пикселей. Это повторяется до конца первой горизонтальной «полосы». Начиная вновь с левой стороны изображения и одновременно смещаясь на 128 пикселей в вертикальном направлении, получают вторую горизонтальную «полосу». Смещение в вертикальном направлении создает следующие полосы, пока вся площадь не будет покрыта областями интереса.

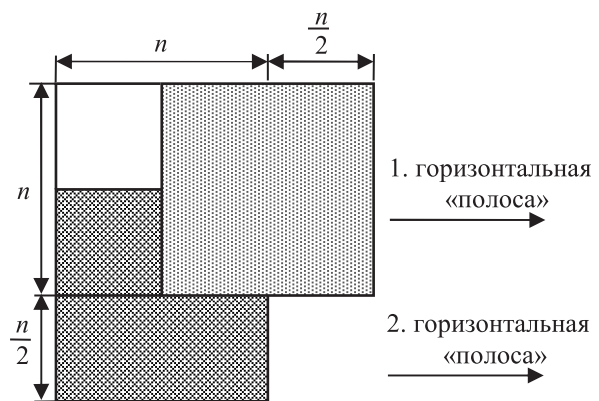


Рис. 3 – Расположение областей интереса

Исследования по определению величины квантовой эффективности регистрации проведены при трех уровнях экспозиционной дозы  $D_1, D_2, D_3$ . При этом  $D_1$  – нормальный уровень экспозиционной дозы (т.е. усредненный уровень, который используется при применении приемника в клинической практике). Уровень  $D_2 = D_1 \cdot 3,2$  и уровень  $D_3 = D_1 / 3,2$ . Для комплекса СИМА были выбраны следующие уровни экспозиционной дозы:  $D_1^C = 160$  мкР,  $D_2^C = 512$  мкР,  $D_3^C = 50$  мкР. Для комплекса МАДИС уровни экспозиционной дозы

составили:  $D_1^M = 200$  мкР,  $D_2^M = 640$  мкР,  $D_3^M = 62,5$  мкР.

Как правило, при испытании систем маммографии используют качество излучения RQA-M1 при наличии дополнительного фильтра (2 мм Al для маммографа СИМА и 0,5 мм Al для маммографа МАДИС).

Определение квантовой эффективности регистрации выполнялось с помощью специального программного обеспечения. Расчеты величины DQE маммографов МАДИС и СИМА проводились с использованием алгоритма определения DQE и MTF, основанного на методике, установленной в [2], и реализованного авторами в среде MATLAB. Разработанная программа оценки DQE и MTF позволяет визуализировать полученные результаты в виде таблиц и графиков и имеет набор функций, аналогичный описанному в [9].

В программу необходимо ввести следующие данные:

- массивы данных снимков чистого поля при различных уровнях дозы, распределенных равномерно в диапазоне от 0 до  $D_1 \cdot 4$  мкР – для определения функции преобразования;

- массивы данных снимков чистого поля на заданном уровне дозы ( $D_1$ ,  $D_2$  или  $D_3$ ) – для определения спектральной плотности шума на выходе;

- массивы данных снимков тест-объекта – для расчета функции передачи модуляции;

- размеры и координаты областей интереса – для получения исходных данных.

В работе программы можно условно выделить три этапа. На первом этапе вычисляется функция преобразования (которая в дальнейшем применяется для получения линеаризованных данных) и спектральная плотность квантового шума на входе. Далее формируется массив элементов линеаризованных данных из снимков чистого поля, используемых в алгоритме. При проведении расчетов характеристик детектора маммографа МАДИС для коррекции неоднородности радиационного поля из линеаризованных данных вычитался двумерный полином второго порядка  $S(x_i, y_i)$ . Он определялся методом наименьших квадратов. Для маммографа СИМА необходимость применения двумерного полинома не возникала, поскольку радиационное поле маммографа СИМА обладает достаточной однородностью. При вычислении двумерного полинома по элементам изображения возникают краевые эффекты, которые приводят к некорректным результатам расчетов. Чтобы исключить влияние краевых эффектов, для вычисления двумерного полинома выбирают область, превышающую по размерам исследуемую область интереса. По линеаризованным данным выполняется расчет спектральной плотности шума на выходе детектора.

На втором этапе производится расчет MTF. Для анализа выбиралась прямоугольная область элементов

детектора с наличием края тест-объекта внутри. По ней определялась функция отклика детектора (LSF) и далее после выполнения преобразования Фурье получали MTF функцию. Дискретный характер размещения приемных фоточувствительных элементов детектора приводит к искажению результата и зависимости измеряемой MTF от взаимного положения детектора и тест-объекта. Если острый край тест-объекта проходит по середине элементов строк или столбцов детектора, то отклик LSF наиболее широкий и MTF на высоких частотах минимальна. Если граница тест-объекта проходит между элементами детектора, то отклик LSF узкий и MTF на высоких частотах максимальна. Усредненное значение MTF по всем возможным размещениям детектора и тест-объекта дает наиболее достоверную характеристику разрешения детектора [10]. Для получения такого усредненного значения тест-объект располагают под углом ( $3^\circ$ – $5^\circ$ ) его края относительно строк/столбцов матрицы приемных элементов детектора. При этом определяют теоретическую LSF по ансамблю элементов, расположенных в различных столбцах/строках элементов детектора и собранных в единый одномерный массив. Благодаря этому определяют величину откликов субэлементного сдвига края тест-объекта.

Методом наименьших квадратов определялся угол поворота края относительно рядов элементов детектора. Далее выполняется процедура суммирования амплитуд двумерной матрицы изображения вдоль линии края тест-объекта и преобразование в одномерный массив откликов. Т.к. поворот был выполнен на небольшой угол, оказалось возможным разбить полученный одномерный массив на более мелкие ячейки, составляющие доли элемента матрицы детектора (субэлементы). Каждый субэлемент нормируется на количество отсчетов двумерного массива, попавших в данный субэлемент. В результате этой процедуры получается профиль ESF, перпендикулярный линии края тест-объекта с размерами субэлементов примерно на порядок меньшими размеров элементов. К полученному профилю ESF применялось пятиточечное дифференцирование, в результате которого получается функция распределения линии LSF.

В случае неоднородного радиационного поля при расчете MTF проводится двумерная коррекция изображения тест-объекта посредством применения двумерного полинома  $S(x_i, y_i)$ . Корректированные данные определяются по формуле

$$I_{кор}(x_i, y_i) = I(x_i, y_i) / S(x_i, y_i) \cdot S_{cp}, \quad (5)$$

где  $S_{cp}$  – усредненное значение яркости пикселя линеаризованных данных в области интереса однородно экспонированного изображения.

На третьем этапе производится вычисление DQE по результатам расчетов, полученным на предыдущих этапах. Для оценки квантовой эффективности регистрации маммографов СИМА и

МАДИС были сформированы наборы снимков, количество которых является целесообразным для данного исследования и позволяет провести расчеты с достаточной точностью:

– 11 снимков «чистого поля» в диапазоне от 0 до  $D_1 \cdot 4$  для определения функции преобразования. При этом минимальный уровень экспозиционной дозы не превышал  $D_1/5$ . Экспозиционные дозы снимков распределены равномерно внутри диапазона  $0-D_1 \cdot 4$ ;

– по 4 снимка «чистого поля» на каждом уровне экспозиционной дозы ( $D_1, D_2, D_3$ ) для определения спектра мощности шума;

– 2 снимка тест-объекта (в вертикальном и горизонтальном положении) на каждом уровне экспозиционной дозы ( $D_1, D_2, D_3$ ) для определения MTF.

Функция преобразования маммографов МАДИС и СИМА линейна, поэтому необходимость определения полной функции преобразования не возникала. Для проверки линейности достаточно выбранного количества снимков. Исходные данные для определения спектра мощности шума были взяты из участка в центре облучаемой области размером  $1024 \times 1024$  пикселей.

На рис. 5 и 6 представлены результаты оценки MTF и DQE в зависимости от пространственного разрешения (пар линий/мм) для маммографов СИМА и МАДИС при нормальном уровне экспозиционной дозы (200 мкР).

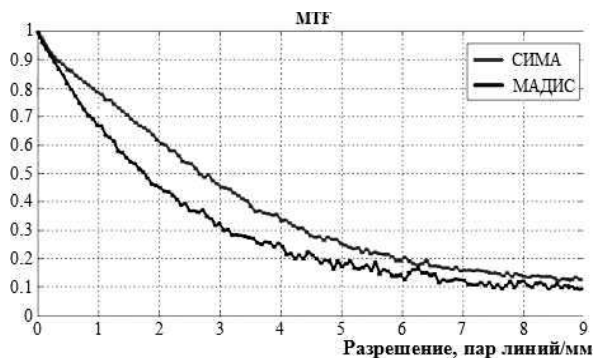


Рис. 5 – Полученные графики функции передачи модуляции для маммографов СИМА и МАДИС

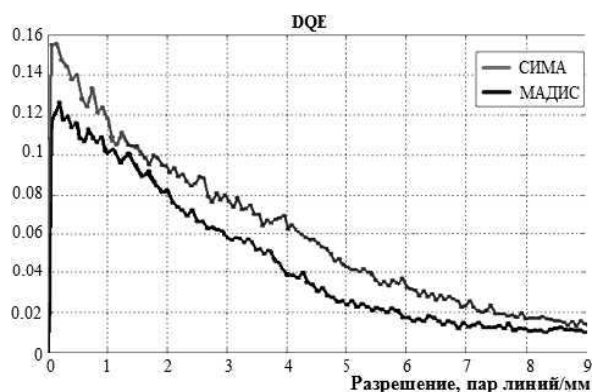


Рис. 6 – Полученные графики квантовой эффективности регистрации для маммографов СИМА и МАДИС

## Выводы

В данной статье описана уточненная методика оценки квантовой эффективности регистрации и функции передачи модуляции для детекторов рентгеновского излучения, построенных по схеме РЛЭ – оптика – ФПЗС-матрица. Такие детекторы применяют при производстве маммографических комплексов СИМА и МАДИС.

Приведены полученные для серийных образцов маммографических комплексов СИМА и МАДИС графики зависимости DQE и MTF детекторов рентгеновского излучения от пространственных частот.

Полученные характеристики качества детекторов излучения маммографических комплексов СИМА и МАДИС по эффективности удовлетворяют требованиям нормативных документов к детекторам рентгеновского излучения.

## Список литературы:

1. Основы рентгенодиагностической техники: Учебное пособие / ред. **Блинов, Н. Н.** – М.: Медицина. – 2002. – 392 с.
2. EN 62220-1-2:2007 Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Determination of the detective quantum efficiency. Detectors used in mammography.
3. ДСТУ EN 62220-1-2:2015 Вироби медичні електричні. Характеристики цифрових рентгенівських пристроїв відтворення зображення. Частина 1-2. Визначення квантової ефективності реєстрування. Детектори для маммографії.
4. **Борисов, А. А.** О двух технологиях построения цифровых приемников рентгеновских изображений / **А. А. Борисов, Ю. А. Вейн, А. И. Мазуров** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2006. – № 5. – С. 7-10.
5. **Мазуров, А. И.** Параметры цифровых приемников и качество изображения // *Медицинская техника.* – 2009. – № 5. – С. 4-6.
6. **Вейн, Ю. А.** Сравнительный анализ технологий построения цифровых детекторов рентгеновских изображений / **Ю. А. Вейн, А. И. Мазуров** // *Медицинская техника.* – 2008. – № 5 (251). – С. 36-40.
7. **Воробьев, А. П.** Матричный арсенид-галлиевый детектор для рентгенографии / **А. П. Воробьев, С. Н. Головня, С. А. Горохов** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2012. – № 5 (275). – С. 21-26.
8. **Блинов, Н. Н.** Микрофокусный способ получения фазоконтрастных рентгеновских изображений / **Н. Н. Блинов, А. Ю. Васильев, Н. С. Серова** [и др.] // *Медицинская техника.* – 2009. – № 4 (256). – С. 5-9.
9. **Кручинин, С. А.** Программное обеспечение для оценки квантовой эффективности регистрации цифровых приемников рентгеновского изображения / **С. А. Кручинин, М. И. Зеликман** // *Медицинская техника.* – 2014. – № 5. – С. 37-40.
10. **Гуржиев, А. С.** Экспериментальное сравнение трех методов измерения разрешающей способности цифровых радиографических систем / **А. С. Гуржиев, С. Н. Гуржиев, Е. М. Мирошников**, [и др.] // *Медицинская техника.* – 2011. – № 2. – С. 1-5.

**Bibliography: (transliterated)**

1. **Blinov, N. N.** Osnovy rentgenodiagnosticheskoy tehniki [Fundamentals of X-ray equipment]. Moscow, Medicina, 2005, 392 p.
2. EN 62220-1-2:2007 Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Determination of the detective quantum efficiency. Detectors used in mammography.
3. DSTU EN 62220-1-2:2015 Virobi medichni elektrichni. Charakteristiki cifrovih rentgeniv'skih pristroiv vidtvorennya zobrazhennja. Chastina 1-2. Vznachennja kvantovoї efektivnosti reestruvannja. Detektori dlja mamografii [Medical electrical equipment. Characteristics of digital X-ray imaging devices. Part 1-2. Definition recording quantum efficiency. Detectors for mammography].
4. **Borisov, A. A., Vejn, Ju. A., Mazurov, A. I.** O dvuh tehnologijah postroennja cifrovih priemnikov rentgenovskih izobrazhenij [About two technologies of construction of digital X-ray imaging detectors]. *Medical equipment*, 2006, **5**, 7-10.
5. **Mazurov, A. I.** Parametry cifrovih priemnikov i kachestvo izobrazhenija [Parameters digital receivers and image quality]. *Medical equipment*, 2009, **5**, 4-6.
6. **Vejn, Ju. A., Mazurov, A. I.** Sravnitel'nyj analiz tehnologij postroennja cifrovih detektorov rentgenovskih izobrazhenij [Comparative analysis of the technology of construction of digital X-ray imaging detectors]. *Medical equipment*, 2008, **5** (251), 36-40.
7. **Vorob'ev, A. P., Golovnja, S. N., Gorohov, S. A.** Matrichnyj arsenid-gallievij detektor dlja rentgenografii [Matrix gallium arsenide detector for X-ray]. *Medical equipment*, 2012, **5** (275), 21-26.
8. **Blinov, N. N., Vasil'ev, A. Ju., Serova, N. S.** Mikrofokusnyj sposob poluchenija fazokonstrastnyh rentgenovskih izobrazhenij [Microfocus X-ray phase-contrast method for producing images]. *Medical equipment*, 2009, **4** (256), 5-9.
9. **Kruchinin, S. A., Zelikman, M. I.** Programmnoe obespechenie dlja ocenki kvantovoj jeffektivnosti registracii cifrovih priemnikov rentgenovskogo izobrazhenija [Software for the evaluation of the quantum detection efficiency of digital X-ray image detectors]. *Medical equipment*, 2014, **5**, 37-40.
10. **Gurzhiev, A. S., Gurzhiev, S. N., Mirosnikov, E. M.** Jeksperimental'noe sravnenie treh metodov izmerenija razreshajushhej sposobnosti cifrovih radiograficheskikh sistem. *Medical equipment*, 2011, **2**, 1-5.

**Безгинова Ольга Николаевна** – инженер-программист ООО «ЭЛКОМЕД», г. Харьков, Украина; e-mail: elkomed@ukr.net

**Bezginova Olga Nikolayevna** – the engineer-programmer of “ELKOMED” Ltd, Kharkiv, Ukraine; e-mail: elkomed@ukr.net

**Литвиненко Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, директор фирмы «РАДМИР» ДП АО НИИРИ, г. Харьков, Украина; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Litvinenko Sergey Viktorovich** – Ph.D., director of the “RADMIR” Company, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Романов Олег Иванович** – главный конструктор по направлению МТ фирмы "РАДМИР" ДП АО НИИРИ, Украина; e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Romanov Oleg Ivanovich** – the chief designer of the direction of MT of the “RADMIR” Company, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: radmir@niiri.kharkov.com

**Хоменко Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор ООО «ЭЛКОМЕД», Украина; e-mail: elkomed@ukr.net

**Khomenko Evgeniy Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior researcher, director of “ELKOMED” Ltd, Kharkiv, Ukraine; e-mail: elkomed@ukr.net

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Безгинова, О. Н.** Оценка квантовой эффективности регистрации детекторов рентгеновского излучения цифровых маммографических комплексов СИМА и МАДИС / **О. Н. Безгинова, С. В. Литвиненко, О. И. Романов, Е. В. Хоменко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 23-28. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

*Please cite this article as:*

**Bezginova, O., Litvinenko, S., Romanov, O., Khomenko, E.** Assessment of the quantum detection efficiency of X-ray detectors, digital mammography complexes MADIS and SIM. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 23-28, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Безгинова, О. М.** Оцінка квантової ефективності реєстрації детекторів рентгенівського випромінювання цифрових маммографічних комплексів СИМА і МАДИС / **О. М. Безгинова, С. В. Литвиненко, О. І. Романов, Є. В. Хоменко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 23-28. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.04.

**АНОТАЦІЯ** У цій роботі описано уточнену методику оцінки квантової ефективності реєстрації та функції передачі модуляції для детекторів рентгенівського випромінювання цифрових маммографічних комплексів СИМА і МАДИС. Ці детектори побудовані за схемою: рентгено-люмінесцентний екран – об'єктив – фоточутлива ПЗС-матриця. Розглянуто фізико-технічні умови формування наборів вхідних даних програми оцінки параметрів маммографічних комплексів СИМА і МАДИС. Наведено отримані для детекторів випромінювання серійно виробляємих зразків маммографічних комплексів СИМА і МАДИС графіки залежності квантової ефективності реєстрації та функції передачі модуляції від просторових частот.

**Ключові слова:** цифровий маммографічний комплекс, детектор рентгенівського випромінювання, квантова ефективність реєстрації, функція передачі модуляції, лінеаризація, спектральна цільність шуму.

Поступила (received) 25.05.2016

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ МАММОГРАММ

Д. А. БОЙКО\*

Кафедра вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

\*email: boo.bda88@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Предложен и обоснован новый метод многокритериальной оценки качества цифрового изображения молочной железы. Разработаны шкалы интегральных оценок качества маммограммы, в основу которых кроме субъективных критериев положены объективные характеристики маммографического изображения. С использованием разработанных шкал врачи-рентгенологи оценивают качество конкретного маммографического снимка. Для сравнения усредненных оценок качества маммографического изображения, полученного в результате обработки различными методами, предлагается использовать различные критерии оптимальности в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** молочная железа, маммограмма, метод, цифровая обработка изображений, экспертные оценки

## IMAGING QUALITY ASSESSMENT OF MAMMOGRAMS

D. A. BOYKO

Department of Computer technology and Programming, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim. The aim of the work is imaging quality assessment of pathological structures on the low-contrast gray-scale images of the mammary gland by developing a new method for multicriteria estimation of the mammograms quality.

Solving methods. A method for multicriteria estimation of the visualization mammograms quality was developed. It is based on expert assessments and taking into account both subjective and objective characteristics of the mammographic images.

Different criteria for optimality in the conditions of uncertainty is proposed to use for the comparison of average expert estimates of the mammographic image quality resulting from the different processing methods.

Results. The proposed method for multicriteria evaluation of the visualization mammograms quality has been tested on real digital mammography images, which were obtained with the help of mammography complex Syma.

The results of a comparative study of mammograms before and using various digital processing techniques have shown that the most optimal for radiologist perception and correct diagnosis is mammography image, which is processed by a method for enhancing imaging quality mammograms IMRI-MAM.

Conclusions. Thus, the application of the method for multicriteria evaluation of the visualization mammograms quality with the help of integrated scales allows to quickly and accurately carry out a visual assessment of the mammographic image quality. The proposed method will get rid of the time-consuming and inaccurate assessment of the modern imaging techniques only by subjective assessment.

**Keywords:** mammary gland, mammogram, method, digital image processing, expert assessments

### Введение

На сегодняшний день во многих развитых странах рак молочной железы (МЖ) является чрезвычайно частой онкологической патологией [1]. Выявление рака МЖ на ранних стадиях развития патологического процесса во многом определяет эффективность лечения и прогноз в целом [2]. Из существующих методов диагностики МЖ маммография является наиболее безопасным и сравнительно недорогим методом. Маммография обладает достаточной информативностью, особенно на ранних этапах нахождения патологии МЖ.

Для обеспечения высокой результативности маммографического обследования больных обязательным является получение высокоинформативной маммограммы в сочетании с низким уровнем облучения пациента. Маммограммы высокого качества являются ключевым фактором

успеха скрининговой программы для обнаружения рака молочной железы.

Для систем цифровой маммографии необходима специальная оценка качества маммографических изображений, которые необходимы для выявления отклонений в состоянии молочных желез. К оценке качества изображений возможны два подхода: объективная оценка с помощью использования математических методов и субъективная оценка на основе экспертных оценок.

К субъективной оценке относятся критерии визуального восприятия изображения, оцениваемые в процессе экспертизы некоторой группой экспертов (врачей-рентгенологов).

Наибольшее распространение получил метод оценок, при котором эксперт оценивает качество рентгеновского изображения в баллах по определенной шкале, считая, что идеальное изображение имеет максимальный балл. Основные шкалы оценок при

использовании метода сравнения приведены в табл. 1 [3]. Результаты экспертных оценок обычно выражают с помощью среднего балла [4].

Таблица 1 – Основные шкалы субъективных оценок качества изображения

| Шкала качества        | Шкала ухудшения             |
|-----------------------|-----------------------------|
| 5 – отлично           | 5 – незаметно               |
| 4 – хорошо            | 4 – заметно, но не мешает   |
| 3 – удовлетворительно | 3 – заметно, немного мешает |
| 2 – плохо             | 2 – мешает                  |
| 1 – очень плохо       | 1 – сильно мешает           |

Однако субъективная оценка – это довольно трудоемкий процесс, который существенно зависит от многих факторов (условий наблюдения, остроты зрения и квалификации врача и т.д.), требует опытных экспертов и не является объективным и универсальным. Кроме того, одной из трудностей, связанных с оценками в баллах, является возможная нелинейность шкалы.

Объективные критерии оценки качества изображения используются для уменьшения влияния субъективного фактора, позволяющие объективно оценить качество и эффективность цифровой обработки, различие или идентичность анализируемых изображений. Объективные оценки могут быть абсолютными или относительными. При использовании относительных оценок качество рассматривается как мера близости двух изображений: реального и эталонного. Сравнения изображений может производиться по критерию среднеквадратической ошибки (СКО), коэффициенту корреляции или отношению Штреля. Существуют также другие сравнительные методы оценки качества изображений, например, норма Минковского [5], мера структурного подобия, предложенная Вангом [6], основанные на приведенных выше критериях или их комбинациях. Отсутствие эталонного изображения молочной железы исключает возможность применения данной группы методов.

Для задачи определения качества рентгеновских изображений по результатам одной экспозиции возможно применение методов абсолютных оценок. При этом абсолютные оценки можно использовать для сравнения изображений, получив их отдельно друг от друга.

Известны следующие абсолютные методы оценки качества изображений [7].

*Оценка разрешающей способности.* Разрешающая способность характеризует предельные возможности системы воспроизводить раздельно близко расположенные детали объекта на изображении, однако, как критерий качества изображения, не учитывает поведение системы в отображении размеров деталей объекта контроля, что может привести к значительным погрешностям в количественной оценке.

*Оценка отношения сигнал/шум.* В качестве критерия рассматривается отношение математического ожидания изображения к СКО шума на выходе системы. Чем больше величина критерия, тем меньше возможные отклонения изображения на выходе системы от среднего. Широкое применение получили благодаря простоте и скорости вычислений.

Недостатком использования данного критерия в системах цифровой обработки изображений, и в частности в цифровых фильтрах, является то, что данная величина не имеет абсолютного значения. При обработке изображений следует также учитывать, что данный критерий плохо согласуется с критерием субъективного восприятия.

*Оценка информационной емкости изображения.* Информационная емкость изображения означает предельное количество информации, содержащейся в изображении, и определяется как [8]:

$$I = n \cdot \log_2 m,$$

где  $n = M_1 M_2 R^2$  – число разрешаемых элементов изображения;  $R$  – разрешающая способность системы;  $m$  – число различаемых градаций интенсивности.

Важным недостатком информационной емкости является то, что в этом критерии не учитывается смысловое содержание информации.

*Оценка резкости изображения.* Под резкостью изображения понимают степень размытия границы между двумя соседними участками изображения с разной интенсивностью (яркостью). Резкость изображения определяется путем вычисления меры эксцесса двумерного спектра Фурье по следующему алгоритму [9]:

- выделение прямоугольной области на изображении;
- преобразование выделенной области интереса в частотную;
- вычисление меры эксцесса двумерного спектра Фурье полученной области. Эксцесс определяется как отношение четвертого центрального момента и квадрата второго центрального момента (стандартное отклонение в четвертой степени):

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{\mu_4}{\sigma^4},$$

где  $\mu_2$  – второй центральный момент;  $\mu_4$  – четвертый центральный момент;  $\sigma$  – стандартное отклонение. По результатам экспериментов получено соответствие более резкого изображения большей величине эксцесса [9].

В [8] описывается метод оценки резкости изображения по углу наклона профиля яркости изображения на границе перепада.

Однако данные критерии не являются достаточно совершенными и приемлемы к оценке качества изображения только в частных случаях.

*Оценка контраста изображения.* Контраст изображения в целом определяется из контраста отдельных элементов изображения, которые рассматриваются как равнозначные. Контраст каждой пары элементов изображения (например, соседних пикселей по горизонтали и вертикали) определяется следующим образом:

$$K_{ij} = \frac{I_i[x, y] - I_j[x, y]}{I_i[x, y] + I_j[x, y]},$$

где  $I_i[x, y], I_j[x, y]$  – значения яркости элементов изображения.

В результате получается матрица локальных контрастов, проведя усреднение которой получают суммарный контраст изображения [9]. Сюжетность изображения предполагает возможность его использования человеком. Поэтому при оценке контраста, как одного из параметров качества изображения, необходимо учитывать ряд особенностей зрительного восприятия человека, что является сложным и длительным.

*Оценка распределения яркостей элементов изображения.* Согласно экспериментальным исследованиям установлено, что оптимальное, с точки зрения субъективного восприятия, изображение имеет нормальное распределение яркостей его элементов [9]. Оценка качества изображения проводится по степени отклонения реального распределения яркостей от нормального. Однако данный критерий не всегда позволяет объективно оценить качество изображения, особенно с точки зрения его визуального восприятия.

*Оценка распределения энергии изображения по частотным интервалам.* Метод анализа распределений энергии изображения по заданным частотным интервалам основан на исследовании энергетических характеристик в области пространственных частот [10, 11]. Оценка качества изображения по частотным интервалам достаточно трудоёмка, сложна в применении и её использование для целей сравнения бывает затруднено.

Определение абсолютной количественной оценки качества изображения – это очень сложная, трудоёмкая и до сих пор не решенная до конца задача.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка нового метода многокритериальной оценки качества маммограммы, включающего как субъективные, так и объективные характеристики маммографического изображения.

### **Изложение основного материала**

Для решения задачи оценки качества маммографического изображения в общем виде нужно найти количественные оценки, которые

наилучшим образом соответствуют субъективным. Для этого необходимо выполнение следующих этапов:

- подготовка набора изображений, на котором выполняются оценки качества;
- количественный анализ качества изображения различными методами, в результате чего получают оценки качества изображения для каждого метода оценивания;
- субъективный анализ принятого изображения экспертами (врачами-рентгенологами), которым демонстрируются изображения.

В соответствии с выделенными этапами был разработан метод многокритериальной оценки качества маммограмм, основанный на экспертных оценках и учитывающий как субъективные, так и объективные характеристики маммографического изображения. Предлагаемый метод заключается в следующем.

Вначале производится выбор критериев оценки качества диагностических изображений, которые могут быть основаны как на контроле объективных характеристик полученного изображения с использованием тест-объектов, так и на анализе качества изображений экспертами по заданным критериям с учетом вида диагностического исследования.

В маммографии к объективным характеристикам диагностического изображения, которое можно оценить с помощью тест-объектов, относятся такие параметры как: толщина нейлоновых нитей, скопление микрокальцинатов в зависимости от размеров зерен и толщина округлых контрастных образований. К показателям, по которым можно оценить изображение как единое целое, относятся пространственное разрешение и контрастность.

Объем информации на рентгеновском снимке находится в прямой зависимости от разрешающей способности, а именно: объем информации пропорционален квадрату разрешающей способности. При повышении разрешающей способности в 2 раза информативность изображения увеличивается в 4 раза.

Разрешающая способность тесно связана с контрастностью, под которой понимают визуальную воспринимаемую разность оптических плотностей почернения соседних участков снимка. Изображения как с высокой, так и с малой контрастностью оцениваются визуально как недостаточно качественные.

Далее в соответствии с выбранными критериями происходит разработка интегральных шкал оценок качества маммограммы, основанных на контроле как объективных, так и субъективных характеристик маммографического изображения. Структуры разработанных шкал представлены в табл. 2-5.

Таблица 2 – Шкала оценок качества маммографического изображения по толщине нейлоновых нитей

| Нормализованная оценка, к | Шкала качества        | Толщина нейлоновых нитей, мм |
|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 0                         | 1 (очень плохо)       | 1,56 – 1,13                  |
| 0,2                       | 2 (плохо)             | 1,12 – 0,90                  |
| 0,4                       | 3 (удовлетворительно) | 0,89 – 0,76                  |
| 0,6                       | 4 (хорошо)            | 0,75 – 0,55                  |
| 0,8                       | 5 (очень хорошо)      | 0,54 – 0,41                  |
| 1                         | 6 (отлично)           | ≤0,4                         |

Таблица 3 – Шкала оценок качества маммографического изображения по скопленению микрокальцинатов в зависимости от размеров зерен

| Нормализованная оценка, к | Шкала качества        | Размеры зерен, мм |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| 0                         | 1 (очень плохо)       | 0,54 – 0,41       |
| 0,25                      | 2 (плохо)             | 0,40 – 0,33       |
| 0,5                       | 3 (удовлетворительно) | 0,32 – 0,25       |
| 0,75                      | 4 (хорошо)            | 0,24 – 0,17       |
| 1                         | 5 (отлично)           | ≤0,16             |

Затем группе специально отобранных врачей-рентгенологов, компетентных в данной области и получивших детальный инструктаж, в течение некоторого промежутка времени (как правило, не более 30 минут) демонстрируются маммографические изображения. Изображения наблюдаются при оптимальных уровнях яркости (60÷80 кд/м<sup>2</sup>) и фона (20÷30 кд/м<sup>2</sup>), эксперты находятся на оптимальном расстоянии рассматривания от монитора (3÷5 высот экрана). Задача врачей-рентгенологов заключается в оценке качества маммографического изображения в баллах с использованием разработанных интегральных шкал оценок, считая, что идеальное изображение имеет максимальный балл.

Средняя оценка определяется по формуле [12]:

$$g_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^r i \cdot n_i,$$

где  $N$  – общее число оценок;  $n_i$  – число оценок равных  $i$  баллам;  $r$  – количество видов разных оценок.

В табл. 2-5 нормализованные оценки  $k$  выражают относительное качество в диапазоне [0;1].

После этого оценки разных экспертов для одного и того же изображения усредняются.

При шестибалльной системе, когда  $g \in [1, 6]$ :  $k = (g - 1) / 5$ , а средняя оценка качества маммограммы вычисляется в соответствие с формулой:

$$k_{ijcp} = (n_6 + 0,8 \cdot n_5 + 0,6 \cdot n_4 + 0,4 \cdot n_3 + 0,2 \cdot n_2) / N. \quad (1)$$

Таблица 4 – Шкала оценок качества маммографического изображения в зависимости от толщины округлых контрастных образований

| Нормализованная оценка, к | Шкала качества        | Толщина контрастных образований, мм |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 0                         | 1 (очень плохо)       | 2,00 – 1,10                         |
| 0,25                      | 2 (плохо)             | 1,00 – 0,76                         |
| 0,5                       | 3 (удовлетворительно) | 0,75 – 0,51                         |
| 0,75                      | 4 (хорошо)            | 0,50 – 0,26                         |
| 1                         | 5 (отлично)           | ≤0,25                               |

При пятибалльной системе, в случае  $g \in [1, 5]$ :  $k = (g - 1) / 4$ . Средняя оценка определяется по следующей формуле [12]:

$$k_{ijcp} = (n_5 + 0,75 \cdot n_4 + 0,5 \cdot n_3 + 0,25 \cdot n_2) / N. \quad (2)$$

Таблица 5 – Шкала субъективных оценок качества контрастности и резкости маммографического изображения

| Нормализованная оценка, к | Шкала качества  | Комментарии   |
|---------------------------|-----------------|---|
| 0                         | 1 (очень плохо) | Очень плохое. Наблюдаются многочисленные искажения            |
| 0,25                      | 2 (плохо)       | Изображение плохого качества. Наблюдаются некоторые искажения |
| 0,5                       | 3 (приемлемо)   | Изображение приемлемого качества. Искажения не наблюдаются    |
| 0,75                      | 4 (хорошо)      | Изображение высокого качества. Искажения не наблюдаются       |
| 1                         | 5 (отлично)     | Изображение чрезвычайно высокого качества.                    |

Надёжность результатов субъективной экспертизы определяется доверительной вероятностью  $p$ , гарантирующей, что отличие оценки качества, полученной в результате усреднения экспертных оценок, будет отличаться от действительного значения не более чем на допустимую величину (погрешность)  $\Delta$ , являющуюся доверительным интервалом. Экспериментально установлено, что при проведении статических экспериментов на основе визуальной оценки параметров изображений погрешность  $\Delta$  и вероятность  $p$  достаточно выбирать соответственно 0.1 и 0.9.

Далее происходит сравнение усредненных оценок качества изображения, полученного в результате обработки различными методами. Для



выбора наиболее диагностически информативной и качественной маммограммы, полученной в результате цифровой обработки различными методами, предлагается использовать следующие критерии оптимальности в условиях неопределенности: осторожного наблюдателя (Вальда), «максимакса», минимального риска (Сэвиджа), пессимизма-оптимизма (Гурвица) и рациональности (критерий Лапласа).

Для сравнительной оценки качества маммографического изображения  $a_i$ , обработанного различными методами, по критериям  $b_j$  на первом этапе необходимо формализовать используемые переменные:  $\kappa_{ijcp}$  – средние значения оценок качества маммографического снимка  $a_i$  по каждому критерию;  $\kappa(a_i)$  – качество маммограммы  $a_i$ . Далее составляется матрица оценок качества маммограммы в виде табл. 6, где каждая строка таблицы содержит средние значения оценок качества маммограммы по всем критериям оценивания, а каждый столбец – средние значения оценок качества маммограммы по одному критерию оценивания.

Таблица 6 – Матрица оценок качества маммограммы

|       | $b_1$ | $b_2$ | ... | $b_j$ |
|-------|-------|-------|-----|-------|
| $a_1$ | ...   | ...   | ... | ...   |
| $a_2$ | ...   | ...   | ... | ...   |
| ...   | ...   | ...   | ... | ...   |
| $a_i$ | ...   | ...   | ... | ...   |

Критерий Вальда – это максиминный критерий, по данному критерию правило принятия решений имеет следующий вид:

$$\kappa(a_i) = \min(\kappa_{ijcp}).$$

Оптимальным для восприятия считается маммографическое изображение из строки с максимальным значением качества [13]:

$$\kappa_{opt} = \max(\kappa(a_i)).$$

Критерий «максимакса» предполагает, что из всех возможных вариантов «матрицы решений» выбирается та альтернатива, которая из всех самых благоприятных ситуаций развития событий имеет наибольшее из максимальных значений (т.е. или максимальное из максимальных):

$$\kappa(a_i) = \max(\kappa_{ijcp}).$$

Маммографическое изображение из строки с максимальным значением качества является оптимальным:

$$\kappa_{opt} = \max(\kappa(a_i)).$$

Критерий Сэвиджа считается минимаксным критерием. Для определения критерия Сэвиджа рассчитывается матрица потерь. Каждый элемент матрицы потерь определяется как разность между

максимальным и текущим значениями оценок качества маммографического изображения в столбце.

Выбор наиболее качественного маммографического изображения согласно критерию Сэвиджа осуществляется следующим образом:

$$\kappa(a_i) = \max(\kappa_{ijcp}).$$

Оптимальный для постановки диагноза считается маммографический снимок из строки с минимальным значением оценки качества:

$$\kappa_{opt} = \min(\kappa(a_i)).$$

Критерий пессимизма-оптимизма (Гурвица) является критерием обобщенного макси/мини. Согласно данному критерию вводится коэффициент оптимизма  $n$  ( $0 < n < 1$ ). Его значение выбирается лицом принимающим решение, в зависимости от опыта принятия решений в условиях неопределенности и личных склонностей к оптимизму ( $n \rightarrow 1-0$ ) или пессимизму ( $n \rightarrow 0+0$ ). При отсутствии ярко выраженных склонностей  $n = 0,5$  представляется наиболее разумным.

Критерий Гурвица находится как взвешенная сумма максимальной и минимальной оценок:

$$\kappa(a_i) = n \max(\kappa_{ijcp}) + (1 - n) \min(\kappa_{ijcp}).$$

Наиболее оптимальной для постановки диагноза считается маммограмма из строки с максимальным значением оценки качества:

$$\kappa_{opt} = \max(\kappa(a_i)).$$

Критерий Лапласа или Байесов критерий позволяет условие неопределенности сводить к условиям риска [13]. Также его называют критерием рациональности, и он подходит для стратегических долгосрочных решений, как и все вышеназванные критерии.

Согласно критерию Лапласа для маммографического снимка, обработанного различными методами цифровой обработки, подсчитывается сумма значений оценок качества по каждому критерию и делится на вероятность выбора данного изображения:

$$\kappa(a_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \kappa_{ijcp},$$

где  $n$  – количество сравниваемых методов цифровой обработки.

Оптимальным для восприятия считается изображение из строки с максимальным значением оценки качества:

$$\kappa_{opt} = \max(\kappa(a_i)).$$

### Обсуждение результатов

Предложенный метод многокритериальной оценки качества маммограмм был апробирован на

реальных цифровых маммографических изображениях, полученных с помощью маммографического комплекса Сима (фирма «РАДМИР» ДП АО НИИРИ, г. Харьков). Оценка качества обработанных цифровых маммограмм осуществлялась компетентными врачами-рентгенологами с использованием разработанных интегральных шкал. На основании полученных усредненных оценок экспертов (врачей-рентгенологов) были составлены матрицы оценок качества для каждой маммограммы. В табл. 7 приведен пример сравнения различных видов обработки для конкретной маммограммы. В табл. 7  $a_1$  – исходное изображение,  $a_2$  – маммограмма, обработанная разработанным автором методом *IMRI-MAM* [14],  $a_3$  – маммограмма, обработанная с использованием комплексного программного обеспечения *GOView Mammo3* [15],  $b_1$  – толщина нейлоновых нитей,  $b_2$  – скопление микрокальцинов в зависимости от размеров зерен,  $b_3$  – толщина округлых контрастных образований,  $b_4$  – пространственное разрешение,  $b_5$  – контрастность.

Таблица 7 – Матрица оценок качества маммограммы

| $a_i$ | $b_j$ |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ | $b_5$ |
| $a_1$ | 0,2   | 0     | 0     | 0     | 0,25  |
| $a_2$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 0,75  |
| $a_3$ | 0,6   | 0,25  | 0,5   | 0,5   | 0,25  |

Результаты сравнения усредненных оценок качества маммографического изображения, полученного в результате обработки различными методами представлены в табл. 8.

Согласно рассчитанным значениям всех критериев наиболее оптимальным для восприятия врачами-рентгенологами и постановки правильного диагноза является маммографическое изображение, обработанное предложенным в [14] автором методом повышения качества визуализации маммограмм *IMRI-MAM* (табл. 8). Оценка качества остальных маммографических изображений показала аналогичный результат.

Таблица 8 – Значения оптимальных коэффициентов качества

| $a_i$ | Конт по критерию Вальда | Конт по критерию «максимакса» | Конт по критерию Сэвиджа | Конт по критерию Гурвица | Конт по критерию Лапласа |
|-------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $a_1$ | 0,00                    | 0,25                          | 0,50                     | 0,13                     | 0,15                     |
| $a_2$ | <b>0,75</b>             | <b>1,00</b>                   | <b>0,00</b>              | <b>0,88</b>              | <b>1,58</b>              |
| $a_3$ | 0,25                    | 0,6                           | 0,40                     | 0,43                     | 0,70                     |

## Выводы

Таким образом, в медицинской практике для решения задачи оценки качества изображений молочной железы предлагается применять разработанный метод многокритериальной оценки качества маммограмм, основывающийся на контроле как объективных, так и субъективных характеристик маммографического изображения. Предложенный метод позволит избавиться от трудоемкой и неточной современной методики оценки изображений посредством только субъективной экспертизы.

## Список литературы

- 1 **Wood, W. C.** Cancer of the breast / **W. C. Wood, H. B. Muss, L. J. Solin, S. Hellman, S.A. Rosenberg** (eds) // *Cancer Principles and Practice of Oncology*. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins. – 2005. – P.1453-1462.
- 2 **Dyrstad, S. W.** Breast cancer risk associated with benign breast disease: systematic review and meta-analysis / **S. W. Dyrstad, Y. Yan, A. M. Fowler, G. A. Colditz** // *Breast Cancer Res. Treat.* – 2015. – N 149(3). – 569-75. – doi: 10.1007/s10549-014-3254-6.
- 3 **Фисенко, В. Т.** Компьютерная обработка и распознавание изображений / **В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко** // учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2008. – 192 с.
- 4 Введение в обработку изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://blog.piclab.ru/download/DIP\\_Introduction.pdf](http://blog.piclab.ru/download/DIP_Introduction.pdf).
- 5 **Макаров, А. О.** Алгоритмы увеличения пространственного разрешения и обработки мультиспектральных спутниковых изображений / **А. О. Макаров** // Дис. канд. техн. наук: 05.13.01. – Минск, 2006. – 156 с.
- 6 **Wang, Z.** Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / **Z. Wang** // *IEEE transaction on Image Processing*. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 309-312. – doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- 7 **Григоров, М. С.** Математическое и программно-техническое обеспечение неразрушающего рентгеновского контроля электронных модулей / **М. С. Григоров** // Дис. канд. техн. наук: 05.11.13. – Санкт-Петербург. – 2015. – 142 с.
- 8 **Wang, X.** Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur / **X. Wang, B. Tian, C. Liang, D. Shi** // *Congress on Image and Signal Processing*. – 2008. – Vol. 1. – P. 467-470. – doi: 10.1109/CISP.2008.371.
- 9 **Монич, Ю. И.** Оценки качества для анализа цифровых изображений / **Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов** // *Искусственный интеллект*. – 2008. – № 4. – С. 376-386.
- 10 **Черноморец, А. А.** Метод анализа распределения энергий изображений по заданным частотным интервалам / **А. А. Черноморец, О. Н. Иванов** // *Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика*. – 2010. – №19(90). – вып.16/1. – С.161-166.
- 11 **Gonzalez, R.** Digital Image Processing / **R. Gonzalez, Richard E. Woods** // *Pearson Education*. – 2011. – 976 с.
- 12 **Колдаев, В. Д.** Оценка качества алгоритмов сегментации изображений / **В. Д. Колдаев** // *Ключевые проблемы современной науки. Материалы за 10-а международна научна практика конференция Ключови въпроси в съвременната наука* (17-25 април 2014 г.). Технологии. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014. – Том 38. – С. 3-6.
- 13 **Сорока, К. О.** Основи теорії систем і системного аналізу / **К. О. Сорока** // навч. посібник. – 2-ге вид. перероб. та випр. – Х.: Тимченко. – 2005. – 288 с.

- 14 **Бойко, Д. А.** Метод повышения качества визуализации рентгенологических изображений / **Д. А. Бойко, А. Е. Филатова** // *Вестник Национального технического университета "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – №32(1141). – С. 19-26.
- 15 GOPView Mammo3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.contextvision.com/modalities/mammography/>
- Bibliography (transliterated)**
- 1 **Wood, W. C., Muss, H. B., Solin, L. J., Hellman, S., Rosenberg, S.A.** (eds) Cancer of the breast. *Cancer Principles and Practice of Oncology*, Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2005, 1453-1462.
- 2 **Dyrstad, S. W., Yan, Y., Fowler, A. M., Colditz, G. A.** Breast cancer risk associated with benign breast disease: systematic review and meta-analysis. *Breast Cancer Res. Treat.* 2015, **149**(3), 569-75, doi: 10.1007/s10549-014-3254-6.
- 3 **Fisenko, V. T., Fisenko, T. Ju.** Komp'yuternaja obrabotka i raspoznavanie izobrazhenij [Computer processing and image recognition]. *ucheb. Posobie*, SanktPeterburg: SPbGU ITMO, 2008, 192 p.
- 4 Vvedenie v obrabotku izobrazhenij [Introduction to image processing], [Web]: [http://blog.piclab.ru/download/DIP\\_Introduction.pdf](http://blog.piclab.ru/download/DIP_Introduction.pdf).
- 5 **Makarov, A. O.** Algoritmy uvelichenija prostranstvennogo razreshenija i obrabotki mul'tispektral'nyh sputnikovyh izobrazhenij [Algorithms to increase the spatial resolution and multispectral satellite imagery processing]. *Dis. kand. tehn. nauk:* 05.13.01, Minsk, 2006, 156 p..
- 6 **Wang, Z.** Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE transaction on Image Processing*, 2004, **13**(4), 309-312, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- 7 **Grigorov, M. S.** Matematicheskoe i programmno-tehnicheskoe obespechenie nerazrushajushhego rentgenovskogo kontrolja jelektronnyh module [Mathematical and software and technical support for non-destructive X-ray inspection of electronic modules]. *Dis. kand. tehn. nauk:* 05.11.13, Sankt-Peterburg, 2015, 142 p.
- 8 **Wang, X., Tian, B., Liang, C., Shi Blind, D.** Image Quality Assessment for Measuring Image Blur. *Congress on Image and Signal Processing*, 2008, **1**, 467-470, doi: 0.1109/CISP.2008.371.
- 9 **Monich, Ju. I., Starovojtov, V. V.** Ocenki kachestva dlja analiza cifrovyh izobrazhenij [Quality Assessment for the analysis of digital images]. *Iskusstvennyj intellekt [Artificial Intelligence]*, 2008, **4**, 376-386.
- 10 **Chernomorec, A. A., Ivanov, O. N.** Metod analiza raspredelenija jenergij izobrazhenij po zadannym chastotnym intervalam [Distribution of energy analysis method images of certain frequency range]. *Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika [Scientific statements BSU. Ser. History. Political science. Economy. Computer science]*, 2010, **19**(90), 16/1, 161-166.
- 11 **Gonzalez, R., Woods, Richard E.** Digital Image Processing. *Pearson Education*, 2011, 976 p.
- 12 **Koldaev, V. D.** Ocenka kachestva algoritmov segmentacii zobrazhenij. Kljuchevyje problemy sovremennoj nauki [Evaluation of the quality of image segmentation algorithms]. *Materiali za 10-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferencija Kljuchovi voprosi v sovremennata nauka». Tehnologii [Materials for the 10th International scientific practical conference Key issues in modern science]*. Sofija: «Bjal GRAD-BG» OOD, 2014, **38**, 3-6.
- 13 **Soroka, K. O.** Osnovi teorii sistem i sistemnogo analizu [Basic theory of Systems]. *navch. posibnik*. Kharkiv: Timchenko, 2005, 288 p.
- 14 **Bojko, D. A., Filatova, A. E.** Metod povyshenija kachestva vizualizacii rentgenologicheskikh izobrazhenij [Method of improving the quality of visualization of radiological images]. *Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: Information and Modeling*. Khar'kov: NTU «KhPI», 2015, **32**(1141), 19-26.
- 15 GOPView Mammo3 [Web]: <http://www.contextvision.com/modalities/mammography/>

#### Сведения об авторах (About authors)

**Бойко Дмитрий Александрович** – аспирант кафедры вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков; e-mail: [boo.bda88@gmail.com](mailto:boo.bda88@gmail.com)

**Bojko Dmitry Aleksandrovich** – Postgraduate student of the Department of Computer technology and Programming, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine; e-mail: [boo.bda88@gmail.com](mailto:boo.bda88@gmail.com)

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Бойко, Д. А.** Оценка качества визуализации маммограмм / **Д. А. Бойко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 29-35. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.05.

*Please cite this article as:*

**Bojko, D. A.** Imaging quality assessment of mammograms. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 29-35, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.05.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Бойко, Д. О.** Оцінка якості візуалізації мамограмм / **Д. О. Бойко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 29-35. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.05.

**АНОТАЦІЯ** Запропоновано та обґрунтовано новий метод багатокритеріальної оцінки якості цифрового зображення молочної залози. Розроблені шкали інтегральних оцінок якості мамограмм, що засновані на аналізі окрім суб'єктивних критеріїв також об'єктивних характеристик мамографічного зображення. З використанням розроблених шкал лікарі-рентгенологи оцінюють якість конкретного мамографічного знімку. Для порівняння усереднених оцінок якості мамографічного зображення, що отримане внаслідок обробки різними методами, пропонується використовувати різні критерії оптимальності в умовах невизначеності.

**Ключові слова:** молочна залоза, мамограма, метод, цифрова обробка зображень, експертні оцінки

*Поступила (received) 30.06.2016*

## НОВЫЙ МЕТОД ОЗОНИРОВАНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО РАСТВОРА И ЕГО ВНУТРИВЕННОЙ ИНФУЗИИ

Т. А. ГЛУХЕНЬКАЯ<sup>1</sup>, А. В. КИПЕНСКИЙ<sup>2\*</sup>, Е. И. КОРОЛЬ<sup>2</sup>, Е. И. НАЗАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие «Эконика», Одесса, УКРАИНА

<sup>2</sup> Кафедра промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

\*email: kavkpi@ukr.net

**АННОТАЦИЯ** В работе приведена информация о результатах модернизации автоматической озонной установки, проведенной с целью реализации метода корректной дозировки озона в процедурах внутривенной инфузии озонированного физиологического раствора. Кроме того были составлены и проанализированы различные варианты математических моделей процесса насыщения озонем физиологического раствора при отпуске процедур по предложенному методу. Показано, что приемлемые результаты моделирования могут быть получены при использовании упрощенной модели, когда емкость для хранения запаса озон-кислородной смеси рассматривается как звено запаздывания. Установлена взаимосвязь озонируемости физраствора с экономической составляющей эффективности процедуры.

**Ключевые слова:** озонотерапия, внутривенная инфузия, озонная установка, переносной модуль, математическая модель.

## THE NEW OZONIZATION METHOD OF PHYSIOLOGICAL SOLUTION AND ITS INTRAVENOUS INFUSION

T. GLUKHENKA<sup>1</sup>, A. KIPENSKY<sup>2\*</sup>, I. KOROL<sup>2</sup>, E. NAZAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Industrial enterprise "Econika", Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> The industrial and biomedical electronics department, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE,

\*email: kavkpi@ukr.net

**ABSTRACT** The aim of the present work is to elaborate technical solutions which are necessary for the realization of the proper ozone dosage method at intravenous infusion procedures of ozonized physiological solution, and the analysis of the ozone saturation process of physiological solution at the procedures according to this method. This article represents the information about the results of the construction of the automated ozone setting modernization conducted with the aim of the new method realization. There is a description of the principle of its operating taking into account the improved mathematic software. The peculiarities of handheld module for the storage of the ozone-oxygen mixture supply which is also used for the stabilization of the ozone concentration in the ozonized physiological solution in the course of the procedure are stated. For the modeling of the ozone saturation process of the physiological solution according to the new method it was suggested two mathematic models. In the first case for the modeling of the ozonization process it was used the discrete model of the second order system on the basis of the recurrent expressions. In the second case the model of the process was simplified for account of the container of ozone-oxygen mixture storage was treated as a hysteresis element. Consequently the system of the second order was modified into the system with inertia link of the first order and the hysteresis element. The further analysis showed that with the usage of the simplified model, the obtained results are quite acceptable. Besides, it was stated the coherence between the ozonization of the physiological solution and the economical constituent of the procedure efficiency.

**Keywords:** ozone therapy, intravenous infusion, ozone setting, handheld module, mathematic software.

### Введение

Озонотерапия основана на использовании природного вещества и в связи с этим относится к натуральным, немедикаментозным методам лечения [1]. Для озонотерапии характерны простота применения, высокая эффективность, хорошая переносимость, практическое отсутствие побочных действий [2]. В диапазоне терапевтических концентраций озон проявляет иммуномодулирующее, противовоспалительное, бактерицидное, верицидное, фунгицидное, анальгезирующее и другие действия. В лечебной практике озон используется в виде наружного, парентерального и энтерального воздействий, а методы озонотерапии при этом условно могут быть разделены на три группы [3].

К методам *наружного воздействия* принято относить:

- применение насыщенных озонем растворов антисептиков;
- аппликация озонированных мазей и растительных масел;
- газация конечностей озон-кислородной смесью (ОКС) в проточной пластиковой камере.

К *парентеральным методам* воздействия (ОКС вводится с помощью иглы) относятся:

- большая и малая аутогемотерапия озонированной кровью [4];
- экстракорпоральная (воздействие вне тела) обработка ОКС плазмы и лимфы;
- подкожные инъекции ОКС, в том числе в биологически активные точки;

- паравентральное (вдоль позвоночника) внутримышечное введение ОКС [5, 6];
- внутривенные инфузии озонированного физиологического раствора (ОФР).

При патологии желудочно-кишечного тракта находят применение *энтеральные методы* (воздействие через желудочно-кишечный тракт):

- прием озонированной дистиллированной воды;
- кишечные орошения озонированной дистиллированной водой;
- ректальные инфузии ОКС.

Важнейшим условием любого метода озонотерапии является обеспечение строгого дозирования вводимого озона. Если количество введенного озона превышает потенциал антиоксидантных ферментов, то это приводит к переизбытку активных форм кислорода и нарушению равновесия между перекисным окислением липидов и антиоксидантной системой [7]. В том случае, когда количество введенного озона оказывается ниже дозы, необходимой для конкретного пациента, терапевтический эффект может быть не достигнут.

Одним из наиболее популярных методов озонотерапии, который находит широкое применение для решения различных клинических задач, является внутривенная инфузия ОФР. Особенность этого метода состоит в том, что озон в водных растворах разлагается значительно быстрее чем в газовых смесях, что приводит к неизбежному снижению дозы, а, следовательно, и к снижению эффективности проводимой процедуры [8]. Для корректной дозировки озона в процедурах внутривенной инфузии ОФР авторами данной статьи был предложен оригинальный метод [9]. Суть этого метода состоит в следующем:

- на этапе подготовки физиологического раствора (ФР), его барботирование ОКС осуществляется до тех пор, пока концентрация озона (КО) в ОФР не достигнет заданного значения (при необходимости в процессе барботирования КО в ОКС на выходе озонатора автоматически увеличивают или уменьшают);

- в процессе проведения процедуры КО в ОФР поддерживается путем его барботирования ОКС (из специальной емкости) с заданным значением КО.

### Цель работы

Цель данной работы состояла в разработке технических решений, необходимых для реализации метода корректной дозировки озона при проведении процедур внутривенной инфузии озонированного физиологического раствора, и анализе процесса насыщения озоном физиологического раствора при проведении процедур по новому методу.

### Техническая реализация нового метода

Для технической реализации нового метода корректной дозировки озона была необходима модернизация автоматической озоновой установки (АОУ), усовершенствование ее программно-математического обеспечения и разработка переносного модуля для приготовления и инфузии ОФР.

Модернизация АОУ (рис. 1) состояла в том, что на выходе ее пневматического тракта был установлен дополнительный электромагнитный клапан ЭМК 2 и быстроразъемный фитинг 3 для подключения к переносному модулю (рис. 2). Базовые ЭМК 1 и фитинг 2 обеспечивают подачу ОКС для газовых озонотерапевтических процедур. Кроме того в корпусе установки был предусмотрен специальный отсек с датчиком КО в жидкости (ДКОЖ), который представляет собой оптопару открытого типа, работающую в ультрафиолетовой области спектра. При соединении переносного модуля с установкой в оптическом канале датчика размещается стеклянная кювета 15, куда поступает ОФР для измерения в нем КО.



Рис. 1 – Модернизированная автоматическая озоновая установка

Усовершенствование программно-математического обеспечения АОУ заключалось в том, что через 3 минуты после начала барботирования ФР ОКС с заданным значением КО, осуществлялось измерение КО в ОФР. По результатам измерения КО в ОФР корректировалось значение КО в ОКС на выходе установки. В процессе последующего барботирования ФР, концентрация озона в нем периодически измерялась до тех пор, пока она не достигала заданного значения. Процесс барботирования ФР на этом завершался.

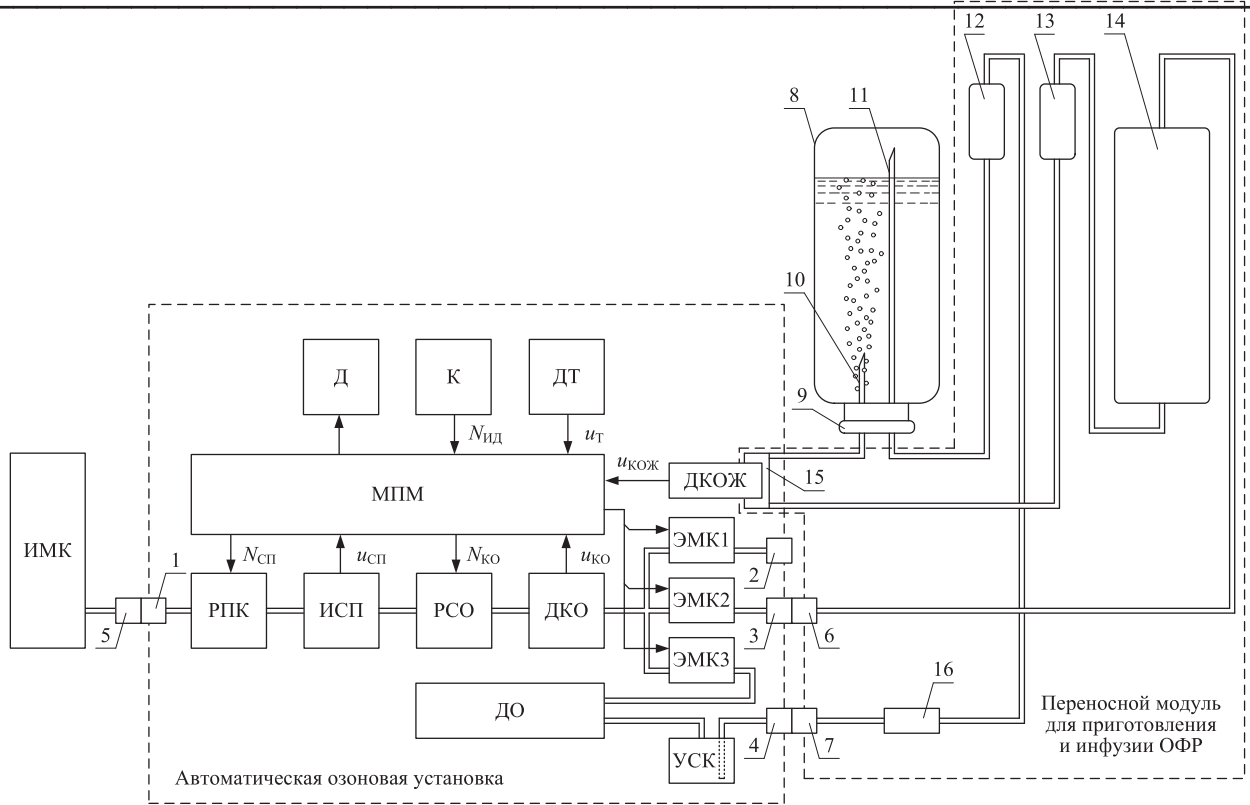


Рис. 2 – Схема модернизированной АОУ с присоединенным переносным модулем

Разработанный переносной модуль BOZON–MOF содержит емкость 14 (см. рис. 2 и 3) для хранения запаса ОКС, две буферные стеклянные емкости 12 и 13 (заполненные фторопластовой стружкой и предназначенные для исключения попадания влаги из флакона 8 с ФР в емкость 14 и в деструктор озона), кювету 15 с ФР в емкость 14 и в деструктор озона), кювету 15 с ФР в емкость 14 и в деструктор озона), кювету 15 с ФР в емкость 14 и в деструктор озона), кювету 15 с ФР в емкость 14 и в деструктор озона).

Приготовление ОФР с помощью модернизированной АОУ осуществляется следующим образом. Установка через фитинги 1 и 5 подсоединяется к источнику медицинского кислорода (ИМК). В переносной модуль устанавливается флакон 8 с ФР (см. рис. 2 и 3), через пробку 9 которого вводятся иглы 10 (с запаянным концом и мелкими боковыми отверстиями) для озонирования ФР и 11 для вывода из флакона отработанной ОКС. Модуль соединяется с установкой с помощью пар фитингов 3 и 6, и 4 и 7 (рис. 1, 2, 3 и 4). Кювета 15 при этом попадает в ДКОЖ.

После включения установки в сеть с переменным напряжением 220 В (на рис. 1 не показано), с помощью клавиатуры (К) и дисплея (Д) (рис. 2 и 4) осуществляется ввод исходных данных  $N_{ид}$ , необходимых для приготовления ОФР (в общем случае это КО в ОКС и объем флакона с ФР). Эти данные считываются микропроцессорным модулем (МПМ), где производится расчет параметров ОКС (КО в ОКС и скорость потока кислорода) с учетом температуры окружающей среды (а соответственно и ФР), которая измеряется датчиком температуры (ДТ) и в виде сигнала  $u_T$  поступает в МПМ. Управляющее воздействие  $N_{сп}$ , соответствующее скорости потока, поступает от МПМ на регулятор потока кислорода (РПК). Стабильность скорости потока обеспечивается МПМ за счет контура обратной связи, содержащего измеритель скорости потока (ИСП), который формирует сигнал  $u_{сп}$ . Управляющее воздействие  $N_{ко}$ , соответствующее КО в ОКС, поступает на

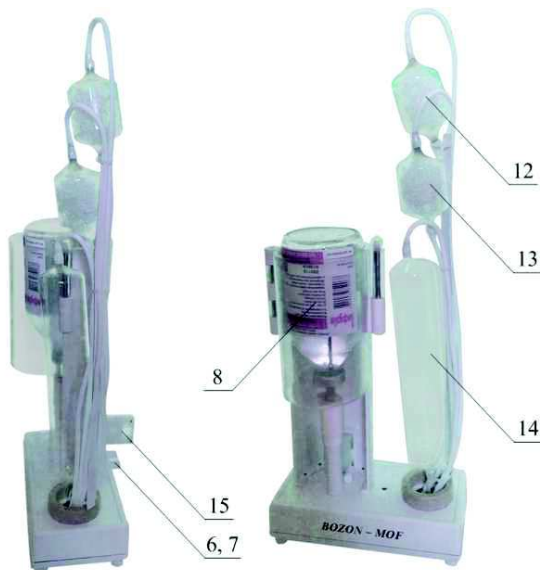


Рис. 3 – Переносной модуль (разные ракурсы) со снятым кожухом

реактор для синтеза озона (PCO). Здесь стабильность КО в ОКС обеспечивается МПМ за счет контура обратной связи, который содержит датчик концентрации озона (ДКО), формирующий на своем выходе сигнал  $u_{КО}$ .

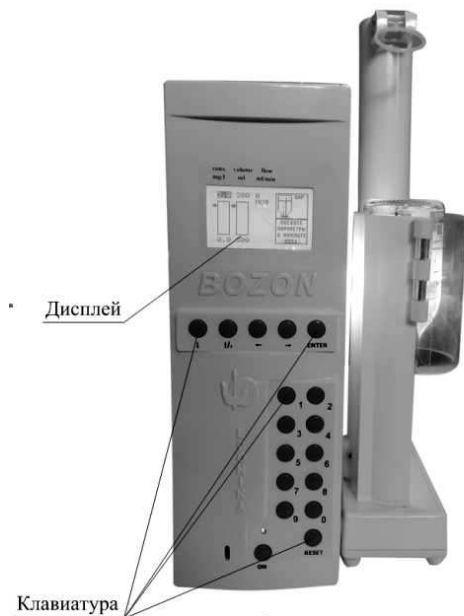


Рис. 4 – Модернизированная АОУ с присоединенным переносным модулем

Для насыщения озонем ФР открывается ЭМК 2 (см. рис. 2) и ОКС через соединенные фитинги 3 и 6, и внутренние магистрали переносного модуля начинает заполнять емкость 14. Поскольку плотность озона выше плотности воздуха он опускается на дно емкости, постепенно перемешиваясь с содержащимся в ней воздухом. Повышение давления в емкости 14 приводит к тому, что газовая смесь через магистрали, буферную емкость 13 и иглу 10 начинает барботировать ФР во флаконе 8. Отработавшая ОКС через иглу 11, магистрали, буферную емкость 12, зажим 16 (находится в открытом состоянии), фитинговое соединение 4 и 7 через устройство для сбора конденсата (УСК) поступает на деструктор озона (ДО) для утилизации.

Через 3 минуты после начала барботирования, ЭМК 2 перекрывает пневмотракт установки, а ЭМК 3 перенаправляет поток ОКС в ДО. Подача ОКС во флакон ФР прекращается и ОФР через иглу 10 заполняет ковту 15. С помощью датчика ДКОЖ производится измерение КО в ОФР. Информация с ДКОЖ, поступающая в виде сигнала  $u_{КОЖ}$ , анализируется МПМ и при необходимости осуществляется корректировка управляющего воздействия  $N_{КО}$ , соответствующего КО в ОКС [9]. Далее ЭМК 3 закрывается, ЭМК 2 открывается и насыщение озонем ФР продолжается. При этом операция измерения КО в ОФР периодически

повторяется до тех пор, пока КО не достигнет заданного значения. После этого ЭМК 2 и ЭМК 3 закрываются, а реактор для синтеза озона и регулятор потока кислорода автоматически выключаются. Приготовление ОФР завершено.

Для отпуска процедуры внутривенной инфузии ОФР, зажимом 16 перекрывается магистраль, и переносной модуль отсоединяется от АОУ. К флакону с ОФР присоединяется стерильная система для инфузий типа ПК-1 и пациенту производится внутривенное вливание озонированного ФР (рис. 5). Разряжение во флаконе по мере истекания ФР, компенсируется ОКС из емкости 14 через иглу 10.



Рис. 5 – Отпуск процедуры внутривенной инфузии ОФР с помощью переносного модуля

Экспериментальные исследования и медицинская апробация показали, что использование предлагаемого метода проведения процедур внутривенной инфузии ОФР, существенно повышает их эффективность за счет стабилизации КО в ОФР в течение всей процедуры, а стало быть, позволяет достаточно точно обеспечивать озоновую дозу, получаемую пациентом.

#### Моделирование процесса насыщения озонем физиологического раствора по новому методу

В процессе совершенствования метода корректной дозировки озона, авторами были составлены и проанализированы различные варианты математических моделей, которые бы позволили изучать процесс насыщения озонем ФР. При этом основная задача состояла в расчете мгновенных значений концентрации озона в ФР в функции продолжительности барботирования и определении длительности временного интервала, необходимого для насыщения озонем ФР до заданного значения КО.

Если пренебречь временными интервалами забора проб и измерения КО в ОФР, то в процессе

подготовки ФР можно выделить два основных этапа:  
– барбатирование ФР ОКС с КО, соответствующей медицинским методическим рекомендациям (с учетом температуры окружающей среды), до забора первой пробы для измерения КО в ОФР;

– барбатирование ФР ОКС с КО, рассчитанной с учетом значения КО в ОФР (т.е. с учетом свойств озонируемости), измеренного в конце первого этапа.

В общем случае процесс насыщения озонем ФР может быть проанализирован с помощью экспоненциальной модели, которая ранее была предложена авторами [10]. Однако в данном случае, на процесс насыщения озонем ФР существенное влияние будет оказывать емкость 14 для хранения запаса ОКС (см. рис. 2 и 3) переносного модуля BOZON-MOF. При этом емкостью 13 и кюветой 15 можно пренебречь ввиду их малого объема. В математической модели емкость переносного модуля может быть представлена дополнительным инерционным звеном первого порядка. Таким образом процесс насыщения озонем ФР будет представлять собой два последовательных инерционных звена первого порядка, т.е. инерционное звено второго порядка.

Для анализа процесса насыщения озонем ФР была использована дискретная модель, на основе рекуррентного выражения, описывающего инерционное звено первого порядка,

$$C_i = C_{i-1} + (C_{MAX} - C_{i-1}) \cdot \frac{\Delta t}{\tau},$$

где  $C_i$  –  $i$ -й отсчет значения концентрации;  
 $C_{MAX}$  – максимальное значение концентрации, при бесконечно продолжительном наблюдении;

$\Delta t$  – шаг дискретной модели;

$\tau$  – постоянная времени инерционного звена.

Результаты моделирования представлены на рис. 6 при следующих условиях барботирования:

- начальное значение КО в ОКС на выходе озонатора – 15 мг/л;
- скорректированное (после забора пробы и соответствующих вычислений) значение КО в ОКС на выходе озонатора – 20 мг/л;
- скорость потока ОКС – 0,3 л/мин;
- объем емкости переносного модуля – 0,2 л.

На рис. 6 кривой 1 показано изменение КО в ОКС на выходе озонатора, кривой 2 – изменение КО в газовой смеси емкости переносного модуля, а кривой 3 – КО в физрастворе.

Дальнейшие исследования показали, что для получения зависимости  $C_{OFR}(t)$  – концентрация озона в ОФР от продолжительности барботирования, необходимо от дискретной модели перейти к аналитическим выражениям. Однако такой переход осложняется достаточно громоздкими расчетами, которые в отдельных случаях не имеют вещественных решений.

Для решения поставленной задачи было введено допущение о том, что при заполнении емкости переносного модуля ОКС, она не смешивается с содержащимся там воздухом, а вытесняет его через физраствор. При этом система второго порядка, соответствующая процессу насыщения озонем ФР, модифицируется в систему с инерционным звеном первого порядка и звеном запаздывания, наличие которого обусловлено некоторой продолжительностью заполнения емкости ОКС при заданной скорости потока. Такая система имеет аналитическое решение, а модель процесса озонирования физраствора может быть представлена линейными выражениями.

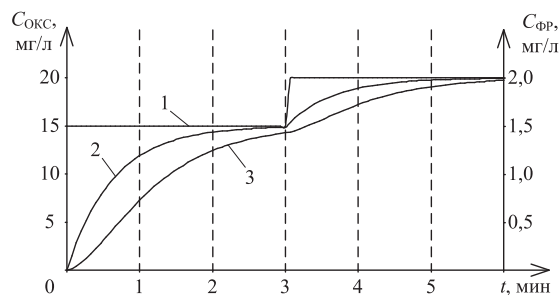


Рис. 6 – Изменения концентрации озона: на выходе озонатора (1), в емкости переносного модуля (2) и в физрастворе (3), рассчитанные с помощью дискретной модели

На рис. 7 приведены результаты моделирования процесса насыщения озонем ФР (при прежних условиях барботирования), полученные с учетом введенного допущения (упрощенная модель).

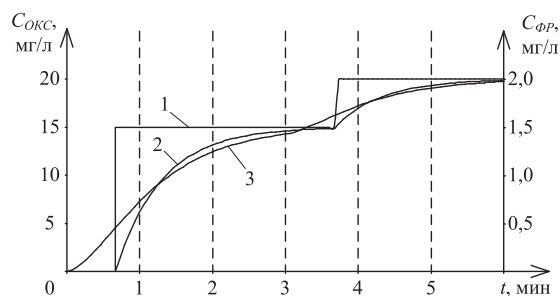


Рис. 7 – Изменения КО в емкости переносного модуля (1) и в физрастворе (2), рассчитанные с помощью упрощенной модели; изменения КО в физрастворе (3), рассчитанные с помощью дискретной модели

Кривой 1 на рис. 7 показано изменение КО в ОКС в емкости переносного модуля, кривой 2 – изменение КО в физрастворе. Для сопоставления результатов моделирования кривой 3 показано изменение КО в ФР, рассчитанное с помощью полной модели.

Из графика, представленного на рис. 7, видно, что мгновенные значения КО в ОФР в различные



моменты времени имеют существенные различия (кривые 2 и 3). Однако, в нашем случае, для анализа процесса насыщения озонем ФР значение имеют лишь следующие показатели:

- мгновенное значение КО в ФР по окончании первого этапа барботирования (в нашем случае это 3 мин);
- мгновенное значение КО в ФР по окончании второго этапа барботирования, когда концентрация озона достигла заданного значения (искомым в этом случае является момент окончания второго этапа);
- интегральные показатели КО, которые с учетом известной скорости потока, позволяют определить массу озона, израсходованную для приготовления ОФР.

Сопоставление результатов моделирования процесса насыщения озонем ФР, полученных с использованием упрощенной модели (рис. 7, кривая 2) и с использованием дискретной модели (рис. 7, кривая 3) позволили установить следующее:

- мгновенное значение КО в ОФР по окончании первого этапа барботирования (через 3 мин после начала) отличаются не более чем на 2,69 %;
- мгновенное значение КО в ОФР по окончании второго этапа барботирования (еще через 3 мин) отличаются не более чем на 0,63 %;
- интегральные показатели КО в ОФР по истечении 3 мин его барботирования отличаются менее чем на 1,1 %;
- интегральные показатели КО в ОФР по истечении 6 мин его барботирования отличаются менее чем на 0,52 %.

С учетом того, что погрешность измерения КО в ОФР выше, чем полученные отклонения, рекомендуется для моделирования процесса насыщения озонем ФР использовать упрощенную модель. Теперь процесс озонирования физраствора может быть представлен четырьмя временными интервалами (см. рис. 8):

- $t_0 - t_1$  – интервал  $T_1$  – заполнение емкости переносного модуля ОКС с КО, соответствующей медицинским методическим рекомендациям;
- $t_1 - t_3$  – интервал  $T_2$  – барботирование физраствора ОКС с КО, соответствующей методическим рекомендациям, длительностью;
- $t_3 - t_4$  – интервал  $T_3$  – заполнение емкости переносного модуля ОКС со скорректированным значением КО, ( $T_3 = T_1$ );
- $t_4 - t_5$  – интервал  $T_4$  – барботирование физиологического раствора ОКС со скорректированным значением КО.

На рис. 8, а показано изменение значения КО в ОКС на выходе озонатора, а на рис. 8, б – изменение значения КО в ОКС в емкости переносного модуля.

Кроме того, для получения аналитических выражений упрощенной модели введем ряд переменных (см. рис. 8, в):

- $t_2$  – смещение по оси времени кривой, соответствующей насыщению физраствора озонем

- путем его барботирования ОКС с КО равной  $C_{ОКС2}$ ;
- $t_3$  – момент определения  $C(t_3)$  – КО в ОФР для корректировки значения КО в ОКС;
- $t_4$  – момент перехода на озонирование физраствора ОКС с КО равной  $C_{ОКС2}$ ;
- $T_5 = t_4 - t_2$  – интервал времени, соответствующий смещению по оси времени кривой насыщения физраствора озонем путем его барботирования ОКС с КО равной  $C_{ОКС2}$ , при котором кривая насыщения проходит через точку  $C(t_4)$ ;
- $T_6 = t_5 - t_2$  – интервал времени, необходимый для достижения КО в ОФР заданного значения при его барботировании ОКС с КО равной  $C_{ОКС2}$ .

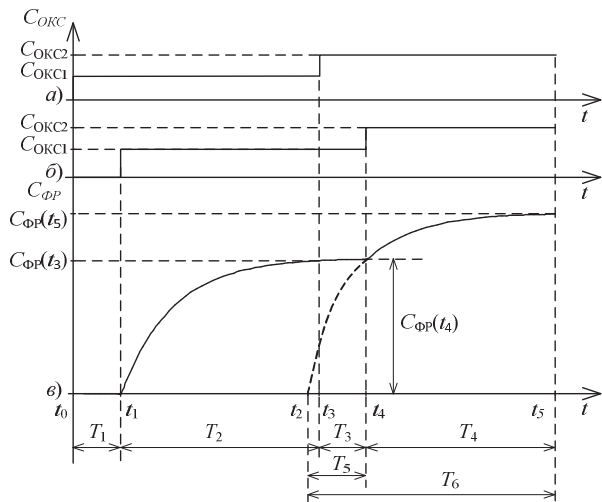


Рис. 8 – К определению параметров упрощенной модели процесса насыщения озонем ФР

Тогда, аналитическое выражение для расчета КО в ФР при его насыщении озонем по новому методу будет иметь вид:

$$C_{\text{НФР}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < t_1; \\ C_{\text{ФР MAX}} [1 - \exp(- (t - t_1) / \tau_{\text{НФР } i})], & \text{если } t_1 \leq t < t_4; \\ C_{\text{ФР MAX}} / K_C [1 - \exp(- (t - t_2) / \tau_{\text{НФР } i})], & \text{если } t_4 < t, \end{cases}$$

где  $C_{\text{ФР MAX}}$  – максимальное значение концентрации в конкретном образце ФР, которое может быть достигнуто при указанных условиях барботирования;

$\tau_{\text{НФР}}$  – постоянная времени насыщения озонем ФР;

$K_C$  – коэффициент коррекции КО в ОКС, рассчитанный по результатам промежуточного замера в момент времени  $t_3$  (3 минуты).

**Расчет продолжительности приготовления ФР и массы озона, израсходованного на озонирование его различных образцов**

Для анализа процесса озонирования ФР с

помощью упрощенной модели, были использованы результаты экспериментальных исследований [10]. Максимальное значение КО в ОФР  $C_{ФР\ MAX}$  и постоянная времени процесса озонирования  $\tau_{н\ ФР}$  для пяти различных образцов ФР сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения параметров процесса насыщения озоном физиологического раствора

| Параметры модели процесса озонирования | Образцы физиологических растворов |        |        |        |        |
|--|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|  | ФР0                               | ФР1    | ФР2    | ФР3    | ФР4    |
| $C_{ФР\ MAX}$ , мг/л                   | 2,155                             | 1,775  | 1,574  | 1,645  | 1,160  |
| $\tau_{н\ ФР}$ , мин                   | 4,867                             | 4,413  | 2,696  | 6,580  | 3,761  |
| $C(t_3)$ мг/л                          | 0,522                             | 0,468  | 0,620  | 0,305  | 0,350  |
| $K_C$                                  | 0,643                             | 0,576  | 0,763  | 0,376  | 0,431  |
| $C(t_4)$ мг/л                          | 0,991                             | 0,876  | 1,057  | 0,602  | 0,637  |
| $T_5$ , мин                            | 1,706                             | 1,476  | 1,936  | 0,976  | 1,017  |
| $T_6$ , мин                            | 4,416                             | 4,621  | 9,408  | 4,024  | 5,116  |
| $T_{ФР}$                               | 06:22                             | 06:48  | 11:08  | 06:43  | 07:46  |
| $M_{ОЗОНА}$ , мг                       | 37,10                             | 43,226 | 61,448 | 57,844 | 63,188 |

При моделировании учитывались следующие параметры системы: расход ОКС  $Q = 0,3$  л/мин, объём промежуточной емкости  $V = 0,2$  л. При таких значениях продолжительность заполнения емкости переносного модуля определяется как

$$T_1 = V / Q,$$

и равна 0,66 минуты.

Используя параметры физиологических растворов определяем концентрацию  $C(t_3)$  по выражению

$$C(t_3) = C_{ФР\ MAX} \left[ 1 - \exp \left( -(t_3 - t_1) / \tau_{н\ ФР} \right) \right].$$

По значению концентрации  $C(t_3)$  в контрольной точке  $t_3$  рассчитывается коэффициент ( $K_C$ ) коррекции КО в ОКС для второго этапа насыщения озоном ФР, в соответствии с методикой [9]. Значение  $C(t_3)$  и коэффициента  $K_C$  для каждого из образцов приведены в табл. 1.

Далее рассчитываем значение концентрации озона  $C(t_4)$  в ФР, в момент времени  $t_4$ , когда емкость будет полностью заполнена ОКС с КО равной  $C_{ОКС\ 2}$ , по выражению:

$$C(t_4) = C_{ФР\ MAX} \left[ 1 - \exp \left( -(t_4 - t_1) / \tau_{н\ ФР} \right) \right].$$

Длительность интервала времени, соответствующего смещению кривой  $C_{ФР}(t)$  насыщения на втором этапе, определяем как

$$T_5 = -\tau_{н\ ФР} \cdot \ln \left( 1 - \frac{C(t_4) \cdot K_C}{C_{н\ MAX}} \right).$$

Длительность интервала, необходимого для достижения заданного значения КО в ОФР, при его барботировании ОКС с концентрацией  $C_{ОКС\ 2}$ , будет равна

$$T_6 = -\tau_{н\ ФР} \cdot \ln \left( 1 - \frac{C(t_5) \cdot K_C}{C_{н\ MAX}} \right).$$

Теперь продолжительность подготовки ОФР может быть определена по выражению:

$$T_{ФР} = t_5 - t_0 = T_1 + T_2 + T_3 - T_5 + T_6,$$

где  $T_1 + T_2 = 3$  мин.

При этом, масса озона, израсходованного для приготовления ОФР, будет определяться выражением:

$$M_{ОЗОНА} = C_{ОКС1} \cdot Q \cdot \left[ t_3 - t_0 + \frac{(t_5 - t_3)}{K_C} \right].$$

Значения параметров процесса озонирования пяти различных образцов ФР, рассчитанных по приведенным выше выражениям, сведены в табл. 1.

Анализ этих параметров показывает, что озонируемость различных образцов ФР оказывается не одинаковой и затраты (продолжительность барботирования и количество израсходованного озона) отличаются почти вдвое. Таким образом, экономическая составляющая эффективности процедур внутривенной инфузии ОФР, будет тем выше, чем выше будет озонируемость ФР.

## Выводы

В результате проделанной работы могут быть сформулированы следующие выводы:

- модернизация автоматической озоновой установки позволила реализовать метод корректной дозировки озона при проведении процедур внутривенной инфузии озонированного физиологического раствора;

- экспериментальные исследования и медицинская апробация нового метода подтвердили его эффективность, которая была достигнута за счет стабилизации концентрации озона в озонированном физиологическом растворе в течение всей процедуры, что позволило достаточно точно обеспечивать озоновую дозу, получаемую пациентом;

- сравнительный анализ различных моделей процесса насыщения озоном физиологического раствора показал, что вполне приемлемые результаты могут быть получены при использовании упрощенной модели, которая представляет этот процесс в виде системы с инерционным звеном первого порядка и звеном запаздывания;

- свойство озонируемости физиологического раствора в существенной степени влияет на экономическую составляющую эффективности процедур внутривенной инфузии ОФР.

## Список литературы

- 1 **Конторщикова, К. Н.** Биологические механизмы эффективности озонотерапии / **К. Н. Конторщикова, Ю. Р. Ефременко, И. Е. Окрут, А. В. Алясова** //

*Казанский медицинский журнал.* – 2007. – Т. LXXXVIII. Приложение к № 4. – С. 3-4.

- 2 **Viebahn, R.** The use of ozone in medicine. 5th English edition – Heidelberg: Karl F. Haug Publishers. – 2007. – 177 p.
- 3 **Масленников, О. В.** Практическая озонотерапия: Пособие / **О. В. Масленников, К. Н. Конторщикова** // *Н. Новгород: Изд-во «Вектор – ТиС»*. – 2003. – 52 с.
- 4 **Mawsouf, M. N.** Ozone Therapy in Patients with Viral Hepatitis “C”. Ten Years Experience / **Mawsouf, M. N., Tanbouli, T. T.** // *Proceedings of IOA Pan American Group Congress.* – 2010. – 32 p. – doi: 10.1080/01919512.2012.720161.
- 5 **Andreula, C. F.** et al. Minimally invasive oxygen-ozone therapy for lumbar disk herniation / **C. F. Andreula** et al. // *AJNR Am J Neuroradiol.* – 2003. – 24(5). – P. 996-1000.
- 6 **Corea, F.** A case of vertebrobasilar stroke during oxygen – ozone therapy / **F. Corea, S. Amici, N. Murgia, N. Tambasco** // *Journal of Stroke and Cerebrovascular Disease.* – 2004. – 13(6). – P. 259-261. – doi:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2004.08.004.
- 7 **Масленников, О. В.** Озонотерапия: Внутренние болезни. / **О. В. Масленников, К. Н. Конторщикова** // *Н. Новгород: Изд-во «Вектор – ТиС»*. – 2003. – 132 с.
- 8 **Бояринов, Г. А.** Растворимость и распад озона в физиологическом растворе / **Г. А. Бояринов, А. С. Гордцов** // *Нижегородский медицинский журнал.* – 2000. – № 2. – С. 40-45.
- 9 **Кипенский, А. В.** Разработка метода корректной дозировки озона в процедурах внутривенной инфузии озонированного физиологического раствора / **А. В. Кипенский, Т. А. Глухенькая** // *Вісник НТУ «ХПІ».* Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 36(1079). – С. 161-172.
- 10 **Глухенькая, Т. А.** Моделирование процессов озонирования физиологического раствора и разложения озона в нем / **Т. А. Глухенькая, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Е. И. Назаров** // *Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування».* – Харків: ТОВ «В справі». – 2015. – С. 29-30.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Kontorshhikova, K. N., Efremenko, Ju. R., Okrut, I. E. and Aljasova, A. V.** Biologicheskie mehanizmy jeffektivnosti ozonoterapii. *Kazanskiy medicinskiy zhurnal.* – 2007, LXXXVIII, 3-4. Prilozhenie to № 4.
- 2 **Viebahn, R.** The use of ozone in medicine. 5th English edition – Heidelberg: *Karl F. Haug Publishers*, 2007, 177 p.
- 3 **Maslennikov, O. V., Kontorshhikova, K. N.** Prakticheskaja ozonoterapija: Posobie. *N. Novgorod: Izd-vo “Vektor – TiS”*, 2003, 52 p.
- 4 **Mawsouf, M. N., Tanbouli, T. T.** Ozone Therapy in Patients with Viral Hepatitis “C”. Ten Years Experience. *Proceedings of IOA Pan American Group Congress*, 2010, 32 p., doi: 10.1080/01919512.2012.720161.
- 5 **Andreula, C. F. et al.** Minimally invasive oxygen-ozone therapy for lumbar disk herniation. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2003, 24(5), 996-1000.
- 6 **Corea, F., Amici, S., Murgia, N., Tambasco, N.** A case of vertebrobasilar stroke during oxygen – ozone therapy. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Disease.* 2004, 13(6), 259-261, doi:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2004.08.004.
- 7 **Maslennikov, O. V., Kontorshhikova, K. N.** Ozonoterapija: Vnutrennie bolezni. *N. Novgorod: Izd-vo “Vektor – TiS”*, 2003, 132 p.
- 8 **Bojarinov, G. A., Gordecov, A. S.** Rastvorimost' i raspad ozona v fiziologicheskom rastvore. *Nizhegorodskij medicinskiy zhurnal.* 2000, 2, 40-45.
- 9 **Kipenskiy, A. V., Gluhen'kaja, T. A.** Razrabotka metoda korrektnoj dozirovki ozona v procedurah vnutrivvennoj infuzii ozonirovannogo fiziologicheskogo rastvora. *Visnik NTU “KhPI”.* Serija «Novi rishennja v suchasniy tehnologijah». – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, 36(1079), 161-172.
- 10 **Gluhen'kaja, T. A., Kipenskiy, A. V., Korol', E. I., Nazarov, E. I.** Modelirovanie processov ozonirovanija fiziologicheskogo rastvora i razlozhenija ozona v nem. *Materiali II Vseukraїns'koy naukovu-tehnichnoy konferenciyi “Aktual'ni problemi avtomatiki ta priladobuduvannja”.* Kharkiv: TOV “V spravi”, 2015, 29-30.

## Сведения об авторах (About authors)

**Глухенькая Татьяна Анатольевна** – Научно-производственное предприятие «Эконика», инженер, ответственный за систему менеджмента качества; г. Одесса, Украина; e-mail: spe\_econika@mail.ru.

**Glukhenka Tetiana** – Industrial enterprise “Econika”, engineer responsible for the management quality system; Odessa, Ukraine, e-mail: spe\_econika@mail.ru.

**Кипенский Андрей Владимирович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: kavkpi@ukr.net.

**Kipenskiy Andrii** – Doctor of Technical Arts, professor, National technical university “Kharkov polytechnic institute”, professor of the industrial and biomedical electronics department; Kharkov, Ukraine, e-mail: kavkpi@ukr.net.

**Король Евгений Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина.

**Korol Ievgen** – Candidate of Technical Arts, National technical university “Kharkov polytechnic institute”, assistant professor of the industrial and biomedical electronics department; Kharkov, Ukraine.

**Назаров Евгений Иванович** – доктор технических наук, Научно-производственное предприятие «Эконика», директор; г. Одесса, Украина; e-mail: spe\_econika@mail.ru.

**Nazarov Eugeny** – Doctor of Technical Arts, Industrial enterprise “Econika”, Director; Odessa, Ukraine, e-mail: spe\_econika@mail.ru.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Глухенькая, Т. А.** Новый метод озонирования физиологического раствора и его внутривенной инфузии / **Т. А. Глухенькая, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Е. И. Назаров** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: «Новые решения в современных технологиях»*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 36-44. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.06.

*Please cite this article as:*

**Glukhenka, T., Kipenskyi, A., Korol, I., Nazarov, E.** The new ozonization method of physiological solution and its intravenous infusion. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "New solutions in modern technologies"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 25 (1197), 36-44, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.06.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Глухенька, Т. А.** Новий метод озонування фізіологічного розчину та його внутрішньовенної інфузії / **Т. А. Глухенька, А. В. Кіпенський, Е. І. Король, Е. І. Назаров** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 36-44. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.06.

**АНОТАЦІЯ** У роботі наведена інформація про результати модернізації автоматизованої озонної установки, що була проведена з метою реалізації метода коректного дозування озону у процедурах внутрішньовенної інфузії озонованого фізіологічного розчину. Окрім того було складено і проаналізовано різноманітні варіанти математичних моделей процесу насичення озоном фізіологічного розчину під час проведення процедур за запропонованим методом. Показано, що прийнятні результати моделювання можуть бути отримані при використанні спрощеної моделі, коли сміність для збереження запасу озono-кісневої суміші розглядається як ланка запізнення. Встановлено взаємозв'язок озонності фізрозчину з економічною складовою ефективності процедури.

**Ключові слова:** озонотерапія, внутрішньовенна інфузія, озонна установка, переносний модуль, математична модель.

*Поступила (received) 05.07.2016*

УДК 654.9; 615.8

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO В ТЕЛЕМЕДИЦИНЕ

**К.В. КОЛЕСНИК\***, **М.А. ШИШКИН\*\***, **О.А. СИТНИКОВА\*\*\***, **К.Н. ПАПИРНЫЙ**

Кафедра Промышленной и биомедицинской электроники, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков,  
УКРАИНА

e-mail: kolesniknet@ukr.net\*, m\_shishkin@inbox.ru\*\*, oasitnikova@mail.ua\*\*\*

**АННОТАЦИЯ:** Создание телемедицинских комплексов для обеспечения контроля биомедицинских параметров пациентов в настоящее время приобретает качественно новое наполнение, обусловленное бурным развитием микропроцессорной техники и растущими потребностями современной медицины в этом виде услуг. Первое можно пояснить совершенствование программно-аппаратной базы микроэлектроники и созданием целого ряда унифицированных устройств микроэлектроники, объединяемые в платформы по принципу возможной комплементарности для совместного использования. Второе же определяется возростанием требований к мобильности и оперативности медицинских услуг, в чем телемедицина открывает новые возможности, создавая при этом предпосылки рассредоточенного медицинского обслуживания, значительно упрощающего весь процесс лечения и реабилитации пациента. Авторы поставили целью исследовать возможность создания эффективного ТМК на базе существующей универсальной программно-аппаратной платформы. При этом для исследований была выбрана унифицированная микропроцессорная платформа Arduino совместно с платформой датчиков e-Health Sensor Platform V2.0. Проведенные исследования показали хорошее качество получаемых биометрических измерений, тем самым подтвердив возможность практического применения предложенных решений.

**Ключевые слова:** биомедицинские параметры, телемедицина, микропроцессорная техника, датчики, унифицированные модули электроники.

## FEATURES OF APPLICATION MODULES ARDUINO PLATFORMS IN TELEMEDICINE

**K. KOLISNYK \***, **M. SHYSHKIN\*\***, **O. SITNIKOVA\*\*\***, **K. PAPIRNYI**

Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov,  
UKRAINE

**ABSTRACT:** The creation of telemedicine systems for monitoring biomedical parameters of patients currently acquires a qualitatively new content, due to the rapid development of microprocessor technology and the growing needs of modern medicine in the form of services. The first can be explained by the improvement of the software and hardware microelectronics base and the creation of a number of commonality of microelectronics devices, united in the platform on the basis of complementarity with vozmozhkoy sharing. The second is determined to high demands for mobility and efficiency of health care services, what Telemedicine opens up new opportunities, creating preconditions dispersed medical process significantly uprotsayuscheho the whole process of treatment and rehabilitation of the patient. The authors have set to investigate the possibility of establishing effective TMK based on the existing universal hardware and software platform. This research was chosen as a unified platform Arduino microprocessor in conjunction with the sensor platform e-Health Sensor Platform V2.0. Studies have shown good quality sex biometric measurements, thereby poddverdiv the possibility of practical application of the proposed solutions. Further work is aimed at minimization of volume of transferable hannyh through the use of a cryptographic algorithm, effective compression and filtering. As well as bringing the format of data transmitted from the standard digital transmission of medical information.

**Keywords:** biomedical parameters satisfying telemedicine, microprocessor technology, sensors, unified electronics modules.

### Введение

Современные телемедицинские комплексы, решая ряд актуальных задач по предоставлению медицинских услуг пациентам, территориально удаленных от лечебных учреждений и консультационных центров [1, 2], должны удовлетворять ряду специфических требований. Эти требования определяются особенностью их функционирования в зависимости от процедур, для которых данные комплексы используются. К таким требованиям можно отнести мобильность, высокую надежность, простоту управления, низкую стоимость и др. [3].

Однако одним из важнейших требований, предъявляемых к телемедицинским комплексам (ТМК), является универсальность их применения по отношению к решаемым задачам контроля биомедицинских параметров пациентов, что связано с возникающей иногда необходимостью быстрой переориентации на различные измеряемые биомедицинские сигналы - в зависимости от текущей потребности. При этом АРМ пациента обычно находится в местах, зачастую удаленных от центров технической поддержки и специалистов, которые могут оперативно решать вопросы по поддержанию их работоспособности (Рис 1).

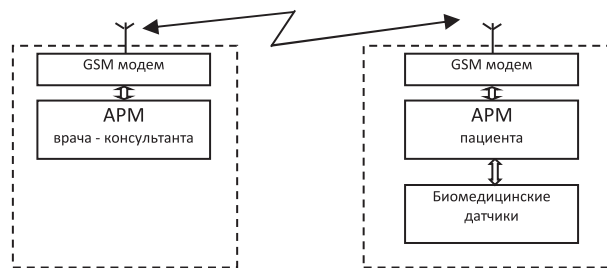


Рис- 1 – Структура ТМК

В данном случае представляется целесообразной модульная конструкция комплекса, позволяющая комплектовать его под конкретную задачу с минимальными затратами времени и ресурсов, имея основной (базовый) набор модулей. Использование универсальных модулей позволит обеспечить надежность комплекса за счет обеспечения технологической отработанности самих модулей, и повышенной восстанавливаемости комплекса путем замены неработоспособных модулей. Функциональная законченность используемых модулей обеспечит простоту интеграции и эксплуатации. А возможность создания разных структур на базе основного модуля (процессора) позволит оперативно менять их конфигурацию и перестраивать под различные задачи.

Кроме этого модульная конструкция комплекса существенно снижает стоимость его создания и эксплуатации.

**Целью** данного исследования является рассмотрение возможности создания эффективного ТМК на базе существующей универсальной программно-аппаратной платформы.

В качестве прототипа телемедицинского комплекса рассматривается использование модулей платформы *Arduino*.

#### Состав и характеристики модулей *Arduino* и датчиков e-Health Sensor Platform V2.0

Модули платформы *Arduino* применяются для создания электронных устройств с возможностью приема сигналов от различных цифровых и аналоговых датчиков, которые могут быть подключены к нему, и управления различными исполнительными устройствами. Проекты устройств, основанные на применении модулей платформы *Arduino* могут работать самостоятельно или взаимодействовать с программным обеспечением Flash, Processing, MaxMSP на персональном компьютере.

Существует несколько версий платформ *Arduino*: *Due*, *Leonardo*, *Yun*, *Micro*, *Uno*, *Duemilanove*, *Diecimila*, *Nano*, *Mega*, *Mini*, *Pro* и др. [4], отличающихся друг от друга типом применяемого процессора и конструктивным исполнением.

Для примера рассмотрим параметры модуля *Arduino Mega 2560*. Платформа *Arduino Mega 2560* построена на микроконтроллере ATmega1280. Платформа содержит 54 цифровых входа/выходов (14

из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.

При этом модуль обеспечивает следующие основные параметры:

- цифровые входы/выходы - 54 (14 - ШИМ);
- аналоговые входы – 16;
- флеш-память - 128 КВ (4 для загрузчика);
- ОЗУ - 8 КВ;
- энергонезависимая память - 4 КВ;
- тактовая частота - 16 МГц.

Модули *Arduino Pro*, *Arduino Pro Mini* выполнены на базе микроконтроллеров ATmega168 или ATmega328, которые производятся в двух исполнениях: 3,3 В / 8 МГц и 5 В / 16 МГц. Платформа содержит 14 цифровых входов и выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, силовой разъем батареи, силовой выключатель, кнопку перезагрузки, отверстия для монтажа силового разъема, блок ICSP и блоки выводов.

Как видно, номенклатура существующих модулей платформы *Arduino* обладает различными вычислительными и конструктивными особенностями, позволяющими рассматривать ее в качестве базовой ячейки различных вычислительных устройств и комплексов, в т.ч. для телемедицины и биомедицинской электроники.



Рис- 2 - Модуль *Arduino Mega 2560*

На рис. 2 показан модуль *Arduino Mega 2560*. Модуль представляет собой плату контроллера с разъемами для подключения внешних устройств и слотами для интеграции модулей различного назначения в единый конструктив. В собранном виде комплекс на базе модулей платформы *Arduino* представляет собой моноблок (рис. 3).



Рис. 3 - Блок модулей *Arduino*

Язык программирования Arduino является реализацией Wiring, аналогичной платформы для «physical computing», основанной на мультимедийной среде программирования Processing. программное обеспечение Arduino работает под ОС Windows, Macintosh OSX и Linux.

Модули платформы *Arduino* могут комплексоваться с другими платформами, такими как *Parallax Basic Stamp*, *Netmedia's BX-24*, *Phidgets*, *MIT's Handyboard*. Это позволяет расширить функциональную полноту разрабатываемых устройств и обеспечить высокую степень их интеграции.

Основными достоинствами данной платформы являются низкая стоимость, наличие большого количества программных библиотек использующих C++ и простота программирования.

Основой платформы *Arduino* являются аппаратные средства на базе микроконтроллеров *ATMega* с возможностью расширения.

Кроме того, устройства на базе модулей платформы *Arduino* могут работать совместно с модулями платформ *Boarduino* от *Adafruit Industries* [4].

Программирование модулей платформы *Arduino*, основанное на СИ++, достаточно хорошо освещено в [5]. Среда разработки *Arduino* состоит из встроенного текстового редактора программного кода, области сообщений, окна вывода текста(консоли), панели инструментов с кнопками часто используемых команд и нескольких меню. Для загрузки программ и связи среда разработки подключается к аппаратной части *Arduino*.

Существует широкая номенклатура датчиков, способных работать совместно с модулями платформы *Arduino* в [6, 7], в том числе и биомедицинского назначения. Биомедицинские датчики используют широкий спектр сенсоров с различными физическими принципами контроля биомедицинских параметров, различных конструктивных исполнений и условий эксплуатации.

Проанализируем основные функциональные возможности датчиков *e-Health Sensor Platform V2.0*, совместимых с *Arduino* и *Raspberry Pi* [8], подключаемые к плата *e-Health Sensor Shield V2.0* (Рис. 4).

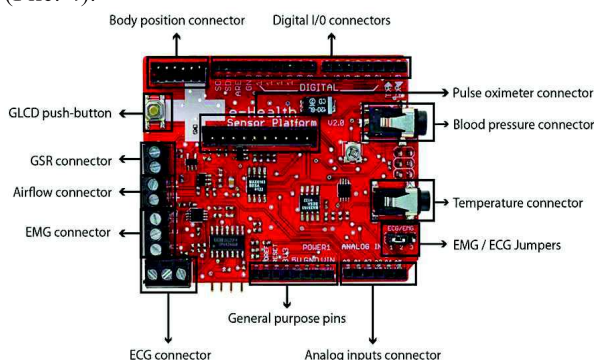


Рис- 4 - Плата *e-Health Sensor Shield V2.0* с разъемами для подключения датчиков

1) *Датчик пульса и кислорода в крови «Pulse and Oxygen in Blood Sensor (SPO2)».*

Использует оптический метод измерения соответствующих данных, для чего необходим вывод с цифровым интерфейсом, который схематично расположен близко к центру платы *e-Health* и имеет десять контактов. Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «Pulse oximeter connector».

2) *Датчик кожно-гальванической реакции «Galvanic Skin Response Sensor (GSR – Sweating)».* Использует контактный метод измерения данных проводимость (потливости) кожи пациента. Для него необходимы выводы с аналоговым интерфейсом, которые расположены на левом торце платы *e-Health* и имеет два отверстия. Данный вывод платы показан Рис. 4 и назван «GSR connector».

3) *Датчик расхода воздуха (дыхание) «Airflow Sensor (Breathing)».*

Использует перорально - назальный метод измерения изменения тепловых воздушных потоков. Для этого датчика необходимы выводы с аналоговым интерфейсом, которые также расположены на левом торце платы *e-Health* ниже предыдущего вывода и имеет два отверстия. Данный вывод платы показан Рис. 4 и назван «Airflow connector».

4) *Датчик электромиографии (ЭМГ) «Electromyography Sensor (EMG)».*

Использует контактный метод измерения электрической активности скелетных мышц в спокойном и напряженном состоянии. Для этого датчика необходимы выводы с аналоговым интерфейсом, которые расположены ниже вывода «Airflow connector» на левом торце платы *e-Health* и имеет три отверстия. Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «EMG connector».

5) *Датчик электромиографии (ЭМГ) «Electromyography Sensor (EMG)».*

Использует контактный метод измерения для оценки электрических и мышечные функции сердца. Для этого датчика необходимы выводы с аналоговым интерфейсом, которые расположены ниже вывода «EMG connector» на левом торце платы *e-Health* и имеет три отверстия (положительные, отрицательные и нейтральные). Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «ECG connector».

6) *Датчик температуры тела «Body Temperature Sensor».*

Использует контактный метод измерения температуры тела пациента. Для датчика температуры необходим вывод с аналоговым интерфейсом, который расположен выше переключки «ECG/EMG jumpers» на правом торце платы *e-Health* и имеет штекер для подключения к соответствующему разъему. Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «Temperature connector».

7) *Датчик артериального давления (тонометр) «Blood Pressure Sensor».*

Использует осциллометрический метод измерения артериальное давления пациента. Для

тонометра необходим вывод с цифровым интерфейсом, который расположен выше разъема «Temperature connector» на правом торце платы e-Health и имеет штекер-переходник для подключения к нему шнура с мини USB, который подключается к сфигмоманометру в соответствующий разъем. Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «Blood pressure connector».

8) Датчик положения пациента (акселерометр) «Patient position sensor (Accelerometer)».

Использует контактный метод контроля положения и движения тела пациента. Для трёх осевого акселерометра необходим вывод с аналоговым интерфейсом, который расположен левее цифровых разъемов «Digital I/O connectors» на верхнем торце платы e-Health и имеет десять контактов. Данный вывод платы показан на Рис. 4 и назван «Body position connector».

9) Датчик содержания глюкозы в крови (глюкометр) «Glucometer Sensor».

Использует фотометрический метод измерения концентрации глюкозы в крови пациента. Для глюкометра необходим вывод с аналоговым интерфейсом, который расположен под выводом «Blood pressure connector» на обратной стороне правого торца платы e-Health и имеет штекер для подключения к соответствующему разъему. Данный вывод платы показан Рис. 4 и назван «Glucometer connector».

В качестве периферийного модуля в платформе используется плата мониторинга состояния пациента в реальном времени e-Health Sensor Platform Complete Kit V2.0.

### Общая архитектура ТМК в системе семейной медицины

Одним из вариантов ТМК общего назначения является комплекс обработки медикодиагностической информации системы семейной медицины.

Для обеспечения работы универсального комплекса обработки медикодиагностической информации системы семейной медицины необходимо построить систему регистрации и обработки медикобиологической и медикодиагностической информации.

Вариант архитектуры такого ТМК [9], приведен на рис. 5.

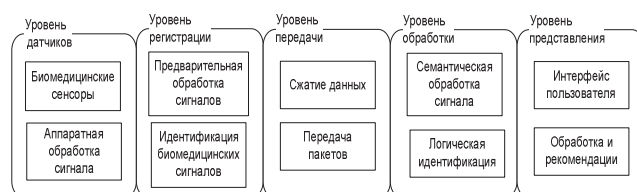


Рис. 5 – Общая архитектура универсального медикодиагностического комплекса семейного врача

Верхний уровень, уровень представления, обеспечивает интерфейс и рекомендательную систему семейного врача. Для эффективного функционирования диалоговой подсистемы рассматриваемый комплекс должен обеспечить сбор медикобиологических параметров с помощью датчиков, регистрацию и обработку полученных сигналов, а также предоставление врачу своевременной, актуальной и полной информации о состоянии здоровья пациента.

Универсальность комплекса предполагает разработку такой архитектуры, которая допускает различные варианты использования комплекса: как в рамках стационарного приемного отделения, так и в мобильных или удаленных вариантах реализации. Выполнение требований мобильности, портативности и масштабируемости реализуется за счет модульности предлагаемой архитектуры. Каждый уровень отвечает за определенный класс задач и может быть реализован как в рамках единого комплекса на единой программно-аппаратной платформе, так и в виде отдельных функционально законченных модульных решений.

Первый уровень предлагаемой архитектуры обеспечивает физическое взаимодействие с пациентом. Учитывая большое количество различных биомедицинских датчиков, используемых в настоящее время, основная задача данного уровня обеспечить прием, фильтрацию и усиление биомедицинских сигналов, что реализуется в аппаратной части приборов.

На втором уровне осуществляется регистрация полученного сигнала и его предварительная обработка. Программно-аппаратная часть модуля, реализующего задачи этого уровня, должна обеспечить представление полученных сигналов в цифровой форме без потери информативной составляющей биомедицинской информации.

Передача данных для последующей их интеллектуальной обработки является особенно важной задачей в условиях реализации мобильных комплексов, или телемедицинских систем. Подсистема передачи данных должна обеспечивать надежность и безопасность. Учитывая мировой опыт, технологии передачи данных необходимо развивать в направлении стандарта GSM, а в качестве технологии передачи данных использовать стандарт GPRS. В сетях GPRS передаваемую информацию разбивают на отдельные пакеты, при обнаружении ошибок неверно принятые пакеты могут быть переданы еще раз. Принципиальное отличие передачи данных в сетях с коммутацией пакетов от передачи данных в сетях с коммутацией каналов заключается в том, что необходимый каналный ресурс выделяется лишь на время передачи соответствующих информационных пакетов.

Остальное время он находится в распоряжении сети. Это позволяет в сетях GSM/GPRS один физический канал использовать для передачи пакетов



нескольких абонентов, а для передачи пакетов одного абонента выделять одновременно несколько физических каналов.

Уровень обработки предлагаемой архитектуры отвечает за логику обработки полученных биомедицинских сигналов, что в совокупности с другой имеющейся в системе медикодиагностической информацией позволит повысить скорость принятия решений врачом, полноту данных и надежность выданных рекомендаций. Реализация функций данного уровня должна строиться на основе математического моделирования с учетом особенностей задачи обработки биомедицинской информации.

Уровень представления содержит интерфейс пользователя, который физически может быть реализован в виде клиентского приложения, что позволит врачу общей практики, семейному врачу вести консультативный прием удаленно, максимально используя функциональные возможности комплекса. На уровне представления также реализуется функция выдачи рекомендаций как интеллектуальная подсистема универсального комплекса обработки медикодиагностической информации. Важной задачей этого уровня также является обеспечение безопасности данных.

### Практическая реализация структуры ТМК семейной медицины с использованием модулей платформы ARDUINO

Рассмотрим практическую реализацию структуры ТМК семейной медицины с использованием модулей платформы ARDUINO в случае необходимости телемониторинга состояния пациента с кардиологическими симптомами, основными биомедицинскими параметрами, контролируемыми при помощи ТМК являются: частота пульса, артериальное давление и кардиограмма [10, 11].

Это обуславливает ряд специфических требований к структуре и характеристикам ТМК, применяемого для дистанционного контроля состояния пациента, таких как:

- необходимость приема и регистрации достаточно большого массива телеметрических данных, обусловленная количеством регистрируемых параметров в случае сложных аналоговых сигналов (например, кардиограммы [11];

- достаточная пропускная способность канала связи, для реализации мониторинга в реальном времени;

- универсальность по типам используемых датчиков, определяемая в ряде случаев необходимостью контроля дополнительных биомедицинских параметров (при наличии сопутствующих заболеваний – астматическая, гипертоническая и др. составляющие, создающих комплексную картину динамики процесса)

- автоматичность и автономность работы ТМК (в ряде случаев пациент самостоятельно не может осуществлять управление своим АРМом).

Для реализации поставленных задач в ТМК на базе модулей платформы ARDUINO можно предложить следующую структуру (Рис 6).

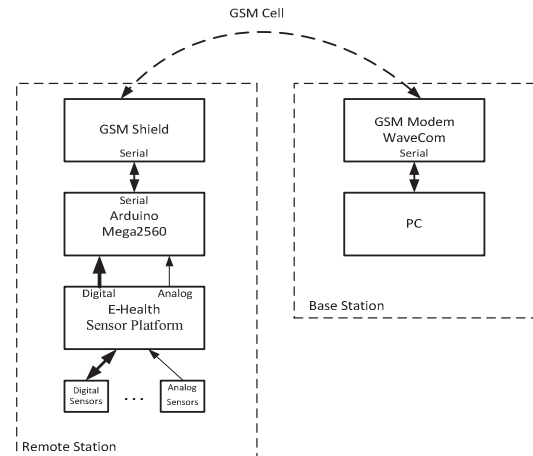


Рис. 6 – Структура экспериментальной модели ТМК на базе Arduino Mega 2560

ТМК состоит из стационарной части (Base Station), в которую входят GSM модем WaveCom и персональный компьютер (PC) с установленным на нем программным обеспечением, и удаленной станции (Remote Station), которая представляет собой соединенные по единому интерфейсу три модуля: Arduino Mega2560, Arduino GSM Shield и e-Health Sensor Platform. Первые два осуществляют обмен данными по последовательному интерфейсу со скоростью 115 кБ. Плата датчиков e-Health подключена к Arduino как по цифровому интерфейсу, так и по аналоговому.

Данная структура удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям к ТМК за счет использования универсальных модулей с необходимыми техническими характеристиками, однако ряд вопросов должны быть решены на программном уровне [12, 13].

### Экспериментальная модель ТМК семейной медицины

Для проведения экспериментальных исследований, подтверждающих возможность передачи биометрических сигналов сложной формы [12, 13], была разработана экспериментальная модель ТМК на основе модулей Arduino Mega 2560, платы e-Health Sensor Platform Complete Kit V2.0 и платы GSM-адаптера Arduino GSM Shield, с использованием датчиков e-Health Sensor Platform V2.0. и программного обеспечения [5]

На рис .6 показан внешний вид модели удаленной станции ТМК на базе Arduino Mega 2560, а на рис. 7 – ТМК с подключенными кардиоэлектродами, используемыми в эксперименте.

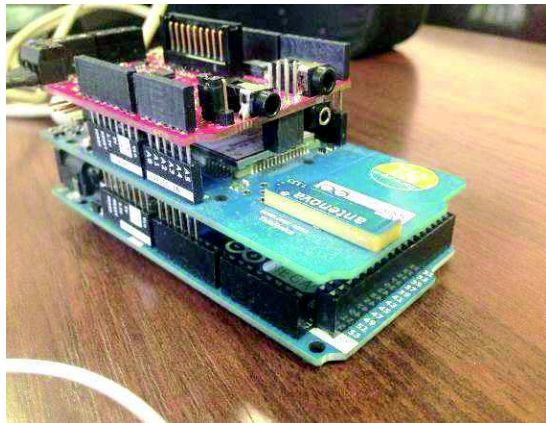


Рис.6 – Экспериментальная модель удаленной станции ТМК на базе Arduino Mega 2560

Экспериментальная модель ТМК была создана в лаборатории биомедицинской электроники НТУ «ХПИ»

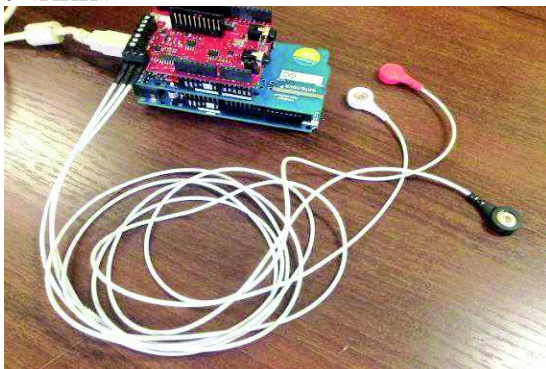


Рис.7 – Экспериментальная модель удаленной станции ТМК с подключенными кардиоэлектродами

**Результаты исследований**

Были проведены исследования возможности измерения параметров пациента, удаленного от АРМа доктора с передачей информации по GSM-каналу связи.



Рис. 8– Измерения пульса и кислорода в крови

На рис 8 представлен внешний вид датчика для измерения пульса и содержания кислорода в крови (пульсоксиметр), Связь между датчиком и удаленной станцией ТМК осуществляется по I2C интерфейсу.

Принятая информация, является идентичной измеренной.

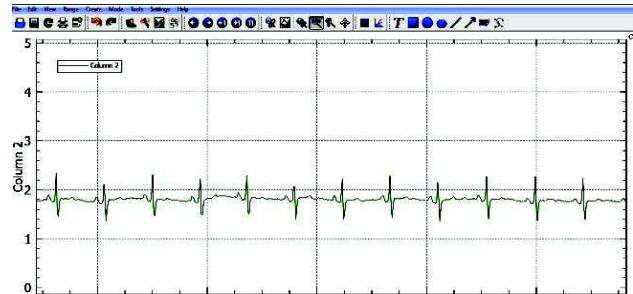


Рис. 9 – Измерение кардиограммы

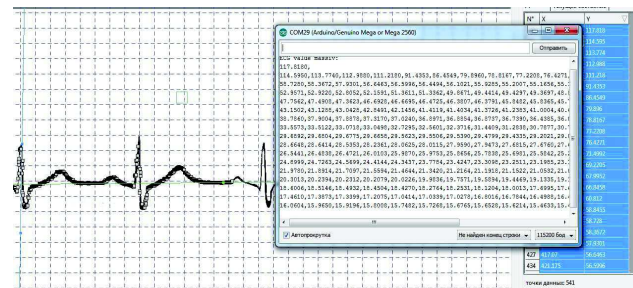


Рис. 10 – Результат восстановления ЭКГ, переданной по GSM каналу

На рис 9 приведены результаты измерения кардиограммы, а на рис. 10 – восстановленный ЭКГ сигнал, переданный по GSM каналу. Обмен данными между прототипом мобильной станции и базовой станцией производился по GPRS протоколу в виде массива 3X256 слов ЭКГ отведений. Прием базовой станцией осуществлялся в течение интервала времени от 30 секунд до 90 секунд с выдачей принятых данных в терминал и текстовый файл.

Исходный тестовый кардиосигнал, оцифрованный массив и выходное окно с принятыми данными представлены на рис.10.

Сравнение исходных данных тестовых массивов с принятыми показал наличие 0,4 процента потери переданных пакетов и 0,02 процента ошибочных данных, что, хотя является удовлетворительным результатом, однако в условиях повышенных помех могут быть значительно выше.

На сегодняшний день ведется работа по имплементации в разрабатываемый комплекс стандарта SCP-ECG, который является на сегодняшний день единым протоколом передачи электрокардиографических данных как между цифровыми кардиографами и компьютеризированной системой управления, так и между компьютерными системами различных производителей.

Сильной стороной SCP–ECG также является хорошая проработка вопроса представления самой ЭКГ - определены минимальные требования к процессу сжатия ЭКГ, предусмотрен вариант разностного кодированием ЭКГ для получения максимального сжатия данных, что не исключает возможности сжатия ЭКГ без потерь на основе кодирования по Huffman или любого другого алгоритма архивации [13].

### Выводы

В результате проделанных исследований практически было подтверждено возможность использования модулей платформы Arduino совместно с датчиками-Health Sensor Platform для получения достаточно качественных биомедицинских данных. Сравнение исходных данных тестовых массивов с принятыми показателем наличие 0,4 процента потери переданных пакетов и 0,02 процента ошибочных данных. Предложенный подход использования ТМК на базе унифицированных программно-аппаратных платформ показал свою эффективность для задач телемедицины.

### Список литературы

1. **Ekeland Anne G.** Effectiveness of telemedicine: A systematic review of reviews / **Ekeland, Anne G., Bowes Alison, Flottorp Signe** // *International journal of medical informatics*. – 2010. – № 79, v. 11. – P. 736-771. – doi: 10.1016/j.ijmedinf.2010.08.006.
2. **Колесник, К. В.** Использование мобильных радиотехнических комплексов в биометрии и телемониторинге / **К. В. Колесник, М.А. Шишкин, А.В. Кипенский, О.А. Ситникова** // *Сборник научных трудов 5-го Международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития. МРФ 2014».* Конференция «Проблемы биоинженерии. Наука и технологии». Харьков, АНПРЭ. ХНУРЭ. – 2014. – С. 72-75.
3. **Scott Richard E.** Principles and Framework for eHealth Strategy Development / **Scott Richard E., Mars Maurice** // *Journal of medical internet research*. – 2013. – № 15(7). – P. 11-24. – doi: 10.2196/jmir.2250.
4. Аппаратная часть платформы Arduino / <http://arduino.ru/>.
5. **Michael Margolis** Arduino Cookbook. Second Edition // O'Reilly Media Inc., USA, 2011.
6. Boarduino. Solderless Breadboard Arduino Clone [Web] <http://www.ladyada.net/make/boarduino/>
7. Arduino Software Release Notes [Web] <https://www.arduino.cc>
8. e-Health Sensor Platform V2.0 for Arduino and Raspberry Pi [Web] <https://www.cooking-hacks.com/>
9. **Сітнікова, О. О.** Ідентифікація системи медико-біологічних параметрів клінічного моніторингу для сімейної медицини / **О. О.Сітнікова, М. В. Почебут** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – vol 5, no 9 (77). – С. 31-36. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.51401.
10. **Шишкин, М. А.** Нечеткая система определения параметров QRS-комплекса ЭКГ в телемедицине / **М. А. Шишкин, К. В. Колесник** // *Сборник научных трудов*

5-го Международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития. МРФ 2014». конференция «Проблемы биоинженерии. Наука и технологии». – Харьков. АНПРЭ. ХНУРЭ. – 2014. – С. 42-43.

11. **Leshem-Rubinow Eran** New Real-Time Loop Recorder Diagnosis of Symptomatic Arrhythmia Via Telemedicine / **Leshem-Rubinow Eran, Berger Michael, Shacham Jacob** // *Clinical cardiology*. – 2011. – 34(7). – P. 420-425. – doi: 10.1002/clc.20906
12. **Шишкин, М. А.** Повышение достоверности кардиосигнала в задачах телемедицины / **М. А. Шишкин, К. В. Колесник** // *Материалы II Всеукраинской научно-практической конференции: Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения*. Харьков. – 2015. – НТУ ХПИ. – С. 95-96.
13. **Шишкин, М. А.** Использование аппаратной платформы Arduino для оптимизации алгоритмов обмена телемедицинскими данными / **М. А. Шишкин, К. В. Колесник** // *Труды XVI Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии: СИЭТ-2015».* Одесса. – 2016. – С. 116-117.

### Bibliography (transliterated)

1. **Ekeland, Anne G., Bowes Alison, Flottorp Signe** Effectiveness of telemedicine: A systematic review of reviews. *International journal of medical informatics*. 2010, **79**(11), 736-771, doi: 10.1016/j.ijmedinf.2010.08.006
2. **Kolesnik, K. V., Shyshkin, M. A., Kipenskiy, A. V., Sitnikova, O. A.** Ispol'zovanie mobil'nyh radiotekhnicheskikh kompleksov v biometrii i telemonitoringe. *Sbornik naučnyh trudov 5-go Meždunarodnogo foruma «Prikladnaâ radioelektronika. Sostoânie i perspektivy razvitiâ. MRF 2014».* Konferenciâ «Problemy bioinženerii. Nauka i tehnologii». Kharkov, ANPRÈ. HNURÈ, 2014, 72-75.
3. **Scott Richard E., Mars Maurice** Principles and Framework for eHealth Strategy Development. *Journal of medical internet research*. 2013, **15**(7), 11-24, doi: 10.2196/jmir.2250.
4. Apparataâ çast' platformy Arduino [Web] <http://arduino.ru/>.
5. **Michael Margolis** Arduino Cookbook. Second Edition. O'Reilly Media Inc., USA, 2011.
6. Boarduino. Solderless Breadboard Arduino Clone [Web] <http://www.ladyada.net/make/boarduino/>
7. Arduino Software Release Notes [Web] <https://www.arduino.cc>
8. e-Health Sensor Platform V2.0 for Arduino and Raspberry Pi [Web] <https://www.cooking-hacks.com/>
9. **Sitnikova, O. O., Pochebut, M. V.** Identifikatsiya sistemi mediko- biologichnih parametrov klinichnogo monitoringu dlya simeynoyi meditsini. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **5 9** (77), 31-36, doi: 10.15587/1729-4061.2015.51401.
10. **Shyshkin, M. A., Kolesnik, K. V.** Neçetkaâ sistema opredeleniâ parametrov QRS-kompleksa ÈKG v telemedicine. *Sbornik naučnyh trudov 5-go Meždunarodnogo foruma «Prikladnaâ radioelektronika. Sostoânie i perspektivy razvitiâ. MRF 2014».* konferenciâ «Problemy bioinženerii. Nauka i tehnologii». Khar'kov. ANPRÈ. HNURÈ, 2014, 42-43.
11. **Leshem-Rubinow Eran, Berger Michael, Shacham Jacob** New Real-Time Loop Recorder Diagnosis of Symptomatic

- Arrhythmia Via Telemedicine. *Clinical cardiology*. 2011, **34**(7), 420-425, doi: 10.1002/clc.20906.
12. **Shyshkin, M. A., Kolesnik, K. V.** Povyshenie dostovernosti kardiosignala v zadachah telemedycyny. *Materialy II Vseukrainskoy naučno-praktičeskoj konferencii: Aktual'nye problemy avtomatiki i priborostroeniâ*. Khar'kov, NTU KhPI, 2015, 95-96.
13. **Shyshkin, M. A., Kolesnik, K. V.** Ispol'zovanie apparatnoj platformy Arduino dlâ optimizacii algoritmov obmena telemedicinskimi dannâmi. *Trudy HVI Meždunarodnoj naučno-praktičeskoj konferencii «Sovremennye informacionnye i êlektronnye tehnologii: SIËT-2015»*. Odessa, 2016, 116-117.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Колесник Константин Васильевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий учебной лабораторией биомедицинской электроники кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника»; г. Харьков, Украина; [kolesniknet@ukr.net](mailto:kolesniknet@ukr.net).

**Kolisnyk Kostyantyn** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Head of educational laboratory of biomedical electronics at the Department «Industrial and biomedical electronics», Kharkov, Ukraine; e-mail: [kolesniknet@ukr.net](mailto:kolesniknet@ukr.net).

**Шишкин Михаил Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника»; г. Харьков, Украина; e-mail: [m\\_shishkin@inbox.ru](mailto:m_shishkin@inbox.ru).

**Shishkin Mihail** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Docent at the Department «Industrial and biomedical electronics», Kharkov, Ukraine; e-mail: [m\\_shishkin@inbox.ru](mailto:m_shishkin@inbox.ru).

**Ситникова Оксана Александровна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника и программирование», г. Харьков, Украина; e-mail: [oasitnikova@mail.ua](mailto:oasitnikova@mail.ua).

**Sitnikova Oksana** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», senior lecturer at the Department of «Hardware and programming», Kharkov, Ukraine; e-mail: [oasitnikova@mail.ua](mailto:oasitnikova@mail.ua).

**Папирный Кирилл Николаевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент группы ЭМС 41Вм кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» Электромашиностроительного факультета, г. Харьков, Украина.

**Papirnyi Kirill** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student of Department «Industrial and biomedical electronics» Faculty of Electric Machine Building, Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Колесник, К. В.** Особенности применения модулей платформы ARDUINO в телемедицине / **К. В. Колесник, М. А. Шишкин, К. Н. Папирный** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 45-52. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.07.

*Please cite this article as:*

**Kolisnyk, K., Shishkin, M., Papirnyi, K.** Features of application modules ARDUINO platforms in telemedicine. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 45-52, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.07.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Колісник, К. В.** Особливості застосування модулів платформи ARDUINO в телемедицині / **К. В. Колісник, М. А. Шишкин, К. М. Папірний** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 45-52. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.07.

**АНОТАЦІЯ** Створення телемедичних комплексів для забезпечення контролю біомедичних параметрів пацієнтів в даний час набуває якісно нове наповнення, обумовлене бурхливим розвитком мікропроцесорної техніки і зростаючими потребами сучасної медицини в цьому виді послуг. Перше можна пояснити вдосконалення програмно-апаратної бази мікроелектроніки і створенням цілого ряду уніфікованість пристроїв мікроелектроніки, що об'єднуються в платформи за принципом взаємодійної комплементарності з спільного використання. Друге ж визначається зростанням вимог до мобільності і оперативності медичних послуг, у чому телемедицина відкриває нові можливості, створюючи при цьому передумови рассредоточенного клінічного перебігу, значно упроцаючого весь процес лікування і реабілітації пацієнта. Автори поставили за мету дослідити можливість створення ефективного ТМК на базі існуючої універсальної програмно-апаратної платформи. При цьому для досліджень була обрана уніфікована мікропроцесорна платформа Arduino спільно з платформою датчиків e-Health Sensor Platform V2.0. Проведені дослідження показали хорошу якість статі біометричних вимірювань, тим самим підтвердив можливість практичного застосування запропонованих рішень.

**Ключові слова:** біомедичні параметри, телемедицина, мікропроцесорна техніка, датчики, уніфіковані модулі електроніки.

*Поступила (received) 01.07.2016*

## ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОПТИЧНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ЦИФРОВОГО ПОРТАТИВНОГО СПИРОМЕТРУ

**В. В. КУЛІЧЕНКО\***, **Р. С. ТОМАШЕВСЬКИЙ**, **В. О. МАКАРОВ**

Кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: kulichenko.viacheslav@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** В статті розглянуті питання зниження енергоспоживання оптичного вимірювального каналу турбінного перетворювача потоку у цифровому портативному спірометрі. Для цього у роботі проаналізовано функціонування турбінного спірометра та виявлено блоки з найбільшим енергоспоживанням. У роботі запропоновано та реалізовано нову функціональну схему оптичного перетворювача на основі цифрового портативного спірометра ЦПС-14/1. Проведено дослідження регульованої характеристики оптичного вимірювального каналу та її залежності від зовнішніх завад, таких як зміна освітлення приміщення і виникнення конденсату на поверхні турбіни під час видиху.

**Ключові слова:** оптичний тахометр, спірометр, енергетичні показники, портативний прилад, зовнішнє освітлення, турбінний перетворювач потоку

## IMPROVING ENERGY CHARACTERISTICS OF OPTICAL MEASUREMENT CHANNEL OF THE DIGITAL PORTABLE SPIROMETER

**V. KULICHENKO, R. TOMASHEVSKYI, V. MAKAROV**

Dept. "Industrial and Biomedical Electronics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** *The purpose of the paper:* reducing the power consumption of the optical measuring channel and the quantify of its impacting on the parameters of turbine flow transducer spirometer are considered. In the work the studying of channel transmission characteristics and its dependence on the most common external factors were carried out. **The methods:** the paper proposed and implemented a new functional scheme of optical transducer based on digital portable spirometer DSP-14/1. The research adjusting optical characteristics of measuring channel and its dependence on external interferences such as changing light room and the appearance of condensation on the surface of the turbine during exhalation is carried out. **The results:** the main consumer of energy in the digital portable spirometer serves a turbine flow transducer. The dependence of LED power of the control signal has a parabolic character. The saturation of parameters of pulse sequence and moment of extinction pulses reach earlier with increasing ambient light intensity. The investigation of condensate impact in three points on the operating range of the control system was conducted. The slight change of level of additional constant component, which over time increases its value, was discovered. **The conclusions:** The research of transfer characteristic of optical channel performance revealed areas where power consumption of optical channel is significantly reduced. The results can be used to develop control algorithm of automatic optical measuring channel, reduce the power consumption of portable spirometer and increase operation time.

**Keywords:** optical tachometer, spirometer, energy efficiency, portable device, external lighting, turbine flow transducer

### Вступ

Світовий досвід та рекомендації провідних установ з охорони здоров'я зазначають, що періодична діагностика органів дихання дозволяє своєчасно виявити порушення функції зовнішнього дихання (ФЗД), які часто призводять до незворотних патологічних змін і різного роду захворювань. [1, 2]. Саме тому впровадження в медичну практику таких скринінгових методів діагностики, як спірометрія є надзвичайно актуальним, особливо в умовах України. Для вирішення цього завдання необхідно забезпечення лікувально-профілактичних закладів сучасними, недорогими технічними засобами діагностики. Також слід відзначити, що затрати на підтримання спірометра в робочому стані перекладаються на споживача і формують вартість медичних послуг.

Спірометрія є найбільш ефективним методом оцінки ФВД із розрахунку ресурси/діагностична цінність. Суть методу полягає в вимірюванні об'ємної швидкості повітряного потоку і визначенні об'ємів повітря на різних етапах виконання дихального тесту пацієнтом [3-6]. Результат спірометричного обстеження являє собою набір наступних даних: карточка пацієнта, залежність об'ємної швидкості потоку  $Q$  від поточного часу  $t$ . На основі цих даних може бути сформований висновок обстеження, який включає в себе:

- графічні залежності  $Q(t)$ ,  $V(t)$ ,  $Q(V)$ ;
- числові значення так званих «показників ФВД», що являють собою характерні точки у вищезазначених залежностях;
- рівень відхилення цих показників від умовної норми.

В Україні у якості такої норми використовуються системи середньостатистичних величин Р.Ф. Клемента и *Knudson*.

Для використання цього методу задля скрінгових досліджень населення спірометрична апаратура, чи спірометри, повинні володіти сукупністю відповідних характеристик: портативність, автономність, конкурентна ціна. Відповідність цим вимогам може бути забезпечена за рахунок:

- використання тахометричного методу вимірювання об'ємної швидкості повітря [7];
- використання в якості елементів живлення акумуляторних батарей виготовлених за сучасними технологіями (*Li-Ion*, *Li-Po* та подібні);
- побудови системи керування, обробки та відображення інформації на елементній базі з низьким рівнем енергоспоживання;
- виконання розрахунків, порівняльний аналіз та вивод графічної інформації за допомогою мобільних пристроїв (планшети, ноутбуки та ін);
- використання режимів зниженого енергоспоживання за рахунок селективної активації елементів необхідних для поточної роботи спірометра.

Тобто звуження функціональних завдань спірометра до реєстрації, попередньої обробки та передачі інформативного сигналу [8, 9]. Але зазначені вимоги не дозволяють зменшити енергоспоживання оптичного вимірювального каналу, що побудований на основі тахометричного методу.

### Мета роботи

Розглянути можливість зниження енергоспоживання оптичного вимірювального каналу та кількісно оцінити його вплив на параметри турбінного перетворювача потоку спірометра. Для цього в роботі були проведені дослідження передатної характеристики каналу, та її залежність від найбільш типових зовнішніх факторів.

### Визначення параметрів та конструктивних особливостей оптичних каналів

В лабораторії біомедичної електроніки був розроблений цифровий портативний спірометр ЦПС-14/1, що відповідає вищезазначеним вимогам, функціональна схема якого зображена на рис. 1.

Пацієнт виконує спірометричний тест шляхом повного видиху повітря з легень через вимірювальну турбіну (ВТ). Повітряний потік, що проходить крізь турбіну перетворюється в обертання пластини ротора. Для реєстрації обертання пластини використовуються два оптичних вимірювальних канали до складу якого входять інфрачервоні випромінювачі (ІЧВ) і фотоприймачі (ФП). В якості ІЧВ використовуються два світлодіодних випромінювачі з максимумом випромінювання на довжині хвилі  $\lambda = 950$  нм.

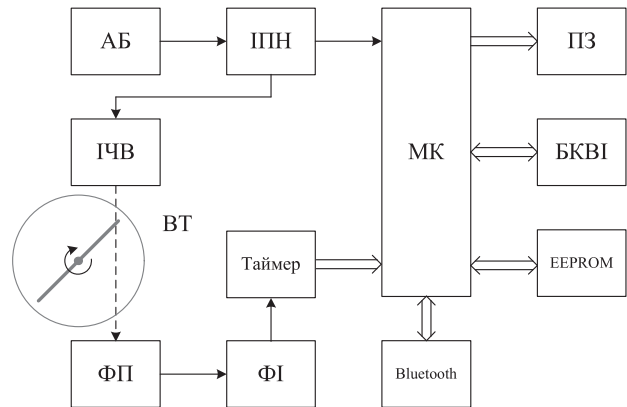


Рис. 1 – Функціональна схема спірометра ЦПС-14/1

Живлення світлодіодів здійснюється постійним струмом, що формує імпульсний перетворювач напруги. Фотоприймачі реалізовані на фототранзисторах які розташовані навпроти випромінювачів і перетворюють модульований світловий потік, що виникає при обертанні пластини, в імпульсну послідовність. Конструкція ТПП наведена на рис. 2, на якому 1 – ІЧВ, 2 – ФП, 3 – корпус ВТ, 4 – пластина ротора.

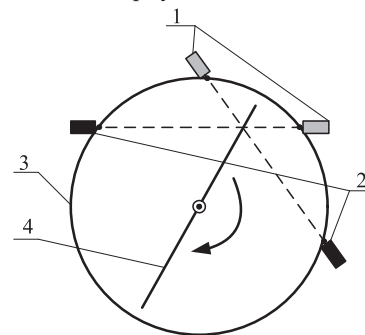


Рис. 2 – Конструкція турбінного перетворювача потоку, що реалізовано у спірометрі ЦПС-14/1

Потік повітря, що проходить у корпусі ВТ, призводить до обертання пластини ротора, з кутовою швидкістю пропорційною об'ємній швидкості потоку повітря. Під час обертання пластина ротора послідовно перекриває оптичні шляхи вимірювальних каналів, що утворені парами ІЧВ-ФП. Завдяки певному розташуванню цих пар відносно одна іншої, з'являється можливість отримувати інформацію про напрям обертання пластини ротора, тобто про напрям потоку повітря.

Обертання пластини у системі оптичних вимірювальних каналів призводить до періодичного переривання світлового променя, що викликає зміну вихідної напруги  $U_{VT}$  фотоприймача з частотою пропорційною кутовій швидкості пластини [10].

Вихідний сигнал має затягнуті фронти і спади, а також не постійну амплітуду, що визначається станом турбіни. Для корекції зазначених недоліків використовуються формувачі імпульсів (ФІ), які

забезпечують необхідну крутизну фронтів і спадів імпульсів з установленою амплітудою. Рівень опорного сигналу, відносно якого формуються імпульси і паузи, задається в середині амплітудного діапазону імпульсної послідовності і є незмінним.

Кожна імпульсна послідовність має інформативний параметр, що представлений у вигляді періоду слідування імпульсів. Для розрахунку параметрів ФЗД імпульсні послідовності надходять на таймер, за допомогою якого визначаються період слідування імпульсів та фазовий зсув між ними для визначення напрямку обертання ротору турбіни. Отримані дані надходять до мікроконтролера (МК) який забезпечує розрахунок параметрів ФЗД.

Результати тестування та дані про пацієнта зберігаються в постійному запам'ятовувальному пристрої (EEPROM) і можуть бути переглянуті з часом. Для організації зв'язку з персональним комп'ютером у спірометрі використовується технологія бездротового зв'язку *Bluetooth*.

Для візуалізації і керування роботою спірометра використовується блок контролю і відображення інформації (БКВІ). Інформація виводиться на символний рідинно-кристалічний індикатор, що має дві строки по 16 символів в кожній. Керування здійснюється за допомогою чотирьох кнопок, поточні функції яких відображаються на індикаторі.

Живлення спірометра здійснюється від двох акумуляторних батарей (АБ) з сумарною напругою не менш 2,4 В. Забезпечення необхідного рівня напруги для роботи всіх елементів схеми здійснюється шляхом використання імпульсного перетворювача напруги.

Слід зазначити, що серед всіх блоків схеми можна виділити елементи цифрової техніки, які при сучасних технологіях виготовлення можуть зберігати працездатність відносно в широкому діапазоні напруги живлення (при номінальній напрузі 3,3 В діапазон гарантованої роботи складає 1,6-3,6 В) та аналогові елементи ІЧВ, ФП і ФІ, вихідні параметри яких сильно залежать від рівня напруги живлення. Окрім того сучасні цифрові елементи мають низьке енергоспоживання, особливо ті що призначені для використання в портативній техніці. В свою чергу елементи оптичних вимірювальних каналів потребують істотних енергетичних затрат для забезпечення стабільної роботи та виключення впливу на їх параметри зовнішніх факторів.

Таким чином в цифровому портативному спірометрі основним джерелом енергоспоживання виступає турбінний перетворювач потоку, а саме оптичні вимірювальні канали, а отже вони і визначають час роботи приладу від одного комплексу гальванічних елементів.

Забезпечення гарантованої реєстрації сигналів потребує встановлення певного рівня інтенсивності випромінювання світловипромінюючих діодів та чутливості фотоприймачів. На сам перед значення

цих параметрів визначається на підставі особливостей розташування оптичних пар одна відносно іншої [11], матеріалу з якого виконана конструкція турбінного перетворювача потоку та використаної елементної бази. Окрім того значний вплив на роботу ТПП здійснюють зовнішнє освітлення та виникнення конденсату на поверхні турбіни під час видиху.

В першому випадку інтенсивність випромінювання, що надходить до фотоприймача являє собою суму від світловипромінюючих діодів і зовнішнього освітлення. Випромінювання з кожного джерела поділяється на дві складові, те що модулюється пластиною ротора, при його обертанні і те що не модулюється, а надходить до фотоприймача через стінки ТПП з урахуванням законів заломлення світла. Слід зазначити, що у випромінюванні яке надходить від світловипромінюючих діодів переважає модульована складова, а з зовнішнього середовища – немодульована. А от же, для забезпечення роботи ТПП слід виконати умову при якій інтенсивність модульованого випромінювання від світловипромінюючих діодів повинна бути більшою ніж від зовнішнього освітлення.

В другому випадку при проходженні випромінювання через ТПП виникають додаткові поверхні, що створюють для заломлення світла, які приводять до збільшення немодульованої складової. Для виключення цього явища необхідно одночасно збільшувати інтенсивність випромінювання від світловипромінюючих діодів і зменшувати чутливість фотоприймача.

Таким чином, для забезпечення гарантованої реєстрації сигналів з ТПП необхідні енергетичні затрати, на створення необхідного рівня інтенсивності випромінювання світлодіодами, значно більші ніж ті, що потребують всі інші елементи приладу. Значення параметрів інтенсивності випромінювання світлодіодів і чутливості фотоприймачів встановлюються на етапі збирання вимірювального приладу під час проведення налагоджування і калібрування й остається незмінним на протязі експлуатації.

Споживання потужності світлодіодами при подачі постійного сигналу керування буде розраховуватися за виразом  $P = U_{VD} \cdot I_{VD}$ , де  $I_{VD}$  – значення сили струму, що протікає через світлодіод при прикладені на нього напруги  $U_{VD}$ . Сила струму визначається на підставі вольт-амперних характеристик (ВАХ), які приводять в технічних даних, на кожне окреме найменування світлодіоду. Слід також зазначити, що ВАХ в діапазоні генерації випромінювання має характер, близький до лінійного, а отже можна описати цю залежність рівнянням прямої з коефіцієнтами  $k$  і  $b$ . Результуюче рівняння для розрахунку споживаної потужності буде мати вигляд:

$$P = k \cdot U_{VD}^2 + b \cdot U_{VD}. \quad (1)$$

Така залежність споживаної потужності від

сигналу керування світлодіодами має квадратичну залежність, а отже навіть незначне зменшення сигналу керування  $U_{VD}$  призведе до значної економії заряду акумуляторної батареї і, як в наслідок, подовжить час роботи портативного спірометра.

**Регулювання енергоспоживання оптичного каналу. Дослідження передатної характеристики.**

Зниження енергоспоживання можна досягти використовуючи систему з можливістю регулювання інтенсивності випромінювання світлодіодів та формувачем імпульсів зі змінним опорним сигналом (рис. 3). Таке технічне рішення дозволяє здійснювати регулювання параметрів керування оптичним каналом під час проведення тесту. Для визначення значення параметрів керування додатково вводиться зворотній зв'язок за сигналом який реєструється безпосередньо з виходу фотоприймача. Узгодження цифрової і аналогової частин схеми здійснюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

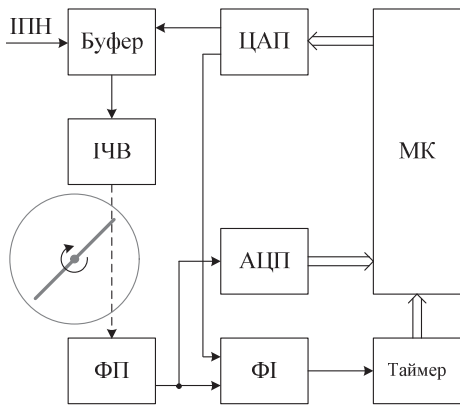


Рис. 3 – Система з можливістю регулювання параметрів керування оптичним каналом

Додаткові елементи в запропонованій схемі є досить поширеними в сучасних мікроконтролерах як інтегровані периферійні компоненти, тому разом з низьким енергоспоживанням мікросхеми не вносять додаткового споживання потужності від елементів живлення. До таких елементів слід віднести, АЦП, ЦАП, компаратор, що виконує функцію формувача імпульсів.

Діапазони зміни сигналів керування і контролю визначаються елементною базою, що використовується при побудові ТПП, а отже на самперед необхідно визначити їх взаємозалежність дослідивши вплив сигналу  $U_{VD}$  на виході ЦАП на сигнал  $U_{VT}$  на вході АЦП. Так як сигнал  $U_{VT}$  на виході фотоприймача являє собою деяку імпульсну послідовність (див. рис. 4), то найбільш доцільно слід визначити параметри амплітуди імпульсу  $U_{VT\_OFF}$  та рівень додаткової постійної складової  $U_{VT\_ON}$ , що зміщує сигнал відносно нульової позначки.

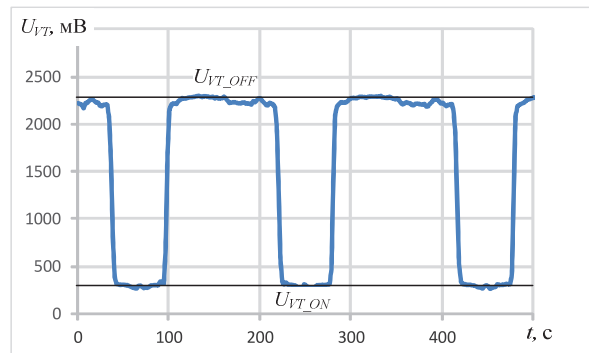


Рис. 4 – Часові діаграми напруги на виході фотоприймача

Значення напруги  $U_{VT\_OFF}$  та  $U_{VT\_ON}$  залежить від інтенсивності випромінювання ІЧВ, а тобто від напруги його живлення  $U_{VD}$ . Таким чином може бути реалізоване регулювання параметрів керування оптичним каналом з урахуванням необхідних значень вихідної напруги ФП (див. рис. 5). При цьому слід зазначити, що основним показником надійної роботи оптичного каналу буде різниця напруги  $U_{VT\_OFF}$  та  $U_{VT\_ON}$ .

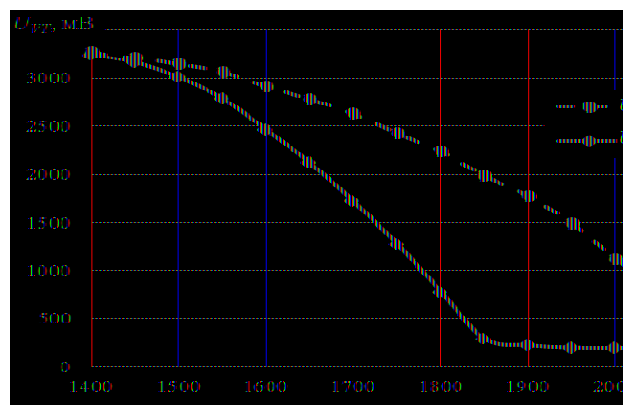


Рис. 5 – Регульовальна характеристика оптичного каналу

Проаналізувавши отримані результати можна виділити діапазон зміни значення сигналу керування  $U_{VD}$  світлодіодним випромінювачем, який знаходиться в діапазоні від 1500 до 2100 мВ. При значеннях  $U_{VD}$  менше 1500 мВ сигналу керування недостатньо для створення випромінювання, що міг би зареєструвати фотоприймач. І навпаки при значеннях  $U_{VD}$  більше 2100 мВ випромінювання, яке обходить пластину ротора стає значно більшим, ніж те, що модулюється нею. Значення сигналу системи керування, при якому досягається максимальна амплітуда вхідного сигналу для формувача імпульсів, знаходиться в точці  $U_{VD} = 1850$  мВ. Після чого рівень додаткової постійної складової  $U_{VT\_ON}$  не зменшується і залишається постійним із-за ефекту насичення фотоприймача. При встановленні значення системи керування рівним  $U_{VD} = 2200$  мВ рівень напруги



імпульсу  $U_{VT\_OFF}$  також досягає насичення і стає рівним  $U_{VT\_ON}$ , а от же імпульсна послідовність повністю зникає і не може бути ідентифікована.

В запропонованій системі використовується той же ТПП, що і в базовій моделі, а от же йому притаманні ті ж самі характеристики й недоліки. Так виключення впливу зовнішнього освітлення забезпечувалося більш потужним випромінюванням світлодіодів. В системі з регульованими параметрами необхідно розуміти вплив зовнішнього освітлення на роботу ТПП при різних значеннях сигналів системи керування. На підставі отриманої регульовальної характеристики (рис. 5) обрано три точки  $U_{VD} = 1600, 1850$  і  $2000$  мВ, що відповідають різним ділянкам робочого діапазону оптичного каналу. Отримані залежності вихідних рівнів фотоприймача в залежності від рівня освітлення наведені на рисунках 6-8.

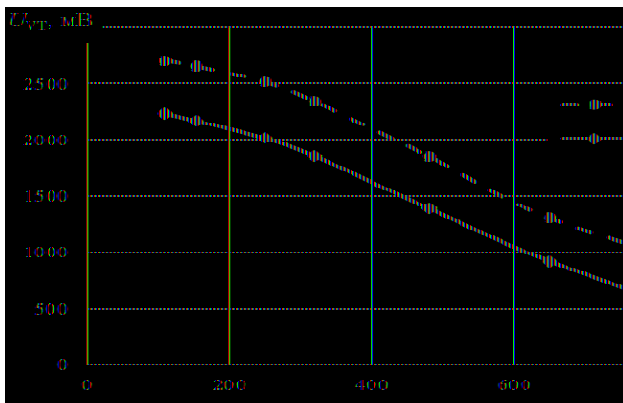


Рис. 6 – Залежність вихідної напруги від зовнішнього освітлення при  $U_{VD} = 1600$

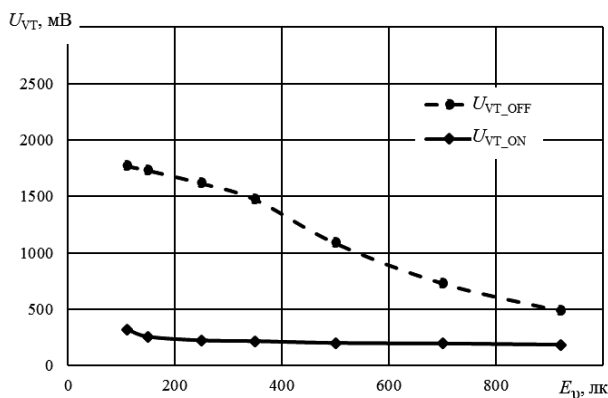


Рис. 7 – Залежність вихідної напруги від зовнішнього освітлення при  $U_{VD} = 1850$

Діапазон освітлення від 100 до 1000 лк об'єднує всю повноту типів приміщення, які пов'язані з функціонуванням людини (вдома, в офісах, в медичних і навчальних закладах, та інших). Проаналізувавши отримані залежності можна зробити висновок, що зовнішнє освітлення однаково впливає на параметри імпульсної послідовності  $U_{VT\_OFF}$  і  $U_{VT\_ON}$  і не впливає на величину імпульсу модульованого випромінювання. Але ефект

насичення фотоприймача починає впливати на роботу ТПП вже при менших значеннях сигналу керування. Таким чином зі збільшенням інтенсивності зовнішнього освітлення раніше настає насичення параметрів імпульсної послідовності, а от же і момент повного зникнення імпульсів.

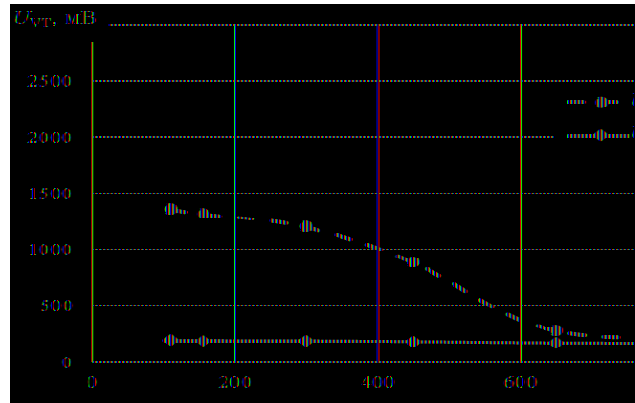


Рис. 8 – Залежність вихідної напруги від зовнішнього освітлення при  $U_{VD} = 2000$

Визначення впливу конденсату, що утворюється під час проведення тесту, оцінювалося на підставі реєстрації сигналу з виходу фотоприймача при проведенні дихальних актів на протязі певного часу. При цьому на внутрішній поверхні турбінного датчика накопичується конденсат у вигляді краплинок мокроти який створює додаткове розсіяння випромінювання.

Дослідження впливу конденсату на трьох точках робочого діапазону параметрів системи керування ( $U_{VD} = 1600, 1850$  і  $2000$  мВ) показали незначну зміну рівня додаткової постійної складової  $U_{VT\_ON}$ , яка з часом збільшувала своє значення. Найбільш яскраво ці зміни видно при значенні  $U_{VD} = 1850$  мВ (див. рис. 9).

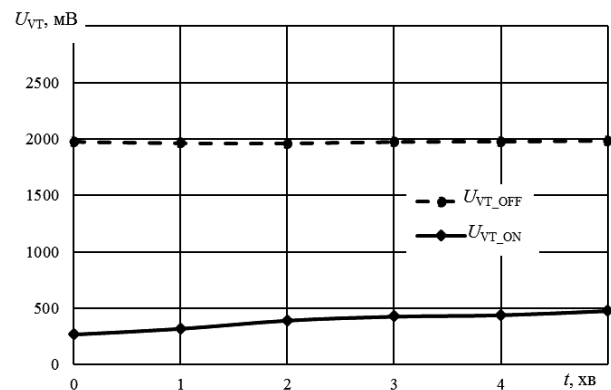


Рис. 9 – Вплив конденсату на вихідні характеристики фотоприймача

Збільшення рівня  $U_{VT\_ON}$  пов'язане з одного боку з утворенням конденсату на ТПП зі сторони світловипромінюючого діода, а отже і ростом розсіяного (немодульованого) випромінювання, і з

іншого боку конденсат на стороні фотоприймача призводить до зменшення модульованого випромінювання на стороні фотоприймача.

Таким чином, для формування імпульсної послідовності з гарантованою реєстрацією сигналу ТПП і мінімальним енергоспоживанням необхідно встановлювати одночасно значення параметрів інтенсивності світловипромінюючого діода  $U_{VD}$  і опорного сигналу  $U_{OC}$  формувача імпульсів на підставі отриманого рівня зворотного зв'язку. Використання змінного опорного сигналу формувача імпульсів дозволяє зменшити амплітуду сформованої імпульсної послідовності, розрахувавши його за виразом:

$$U_{OC} = \frac{U_{VT\_OFF} - U_{VT\_ON}}{2} + U_{VD\_ON}.$$

Однак слід пам'ятати, що напруга живлення спірометра має пульсації, що виникають під час роботи імпульсного перетворювача напруги і цифрових елементів схеми. Такі пульсації можуть викликати випадкове формування імпульсів при малій різниці між напругами  $U_{VT\_OFF}$  та  $U_{VT\_ON}$ .

Для виключення їх впливу (з урахуванням подвійного запасу) слід розраховувати такі параметри керування  $U_{VD}$  при яких буде виконуватися рівняння:

$$U_{VT\_OFF} - U_{OC} = U_{OC} - U_{VT\_ON} \geq 2 \cdot k_p \cdot E,$$

де  $k_p$  – коефіцієнт пульсації напруги живлення;

$E$  – напруга живлення на виході імпульсного перетворювача напруги.

### Висновки

В роботі проаналізовано енергоспоживання окремих блоків спірометра ЦПС-14/1 з урахування можливості використання сучасної елементної бази. Основним джерелом енергоспоживання, яке потребує суттєвого конструкційного перегляду, є оптичний вимірювальний канал. Запропонована модернізація направлена на зниження енергоспоживання шляхом регулювання параметрами оптичного вимірювального каналу під час проведення діагностичного тесту. Проведені дослідження передатної характеристики оптичного каналу дозволили виявити робочі ділянки на яких енергоспоживання оптичного каналу значно зменшується. Додаткові дослідження впливу типових зовнішніх завод дозволили виявити їх кількісну оцінку зміни передатної характеристики та виявити діапазони регулювання параметрів оптичного вимірювального каналу. Отримані результати можуть бути використані при розробці автоматичного алгоритму керування оптичним вимірювальним каналом і як внаслідок для зниження енергоспоживання портативного спірометра та збільшення часу функціонування.

### Список літератури

- 1 Philip H. Quanjer The ERS Global Lung Function Initiative / Philip H. Quanjer, Sanja Stanojevic, Tim J. Cole, Xaver Baur, Graham L. Hall, Bruce H. Culver, Paul L. Enright, John L. Hankinson, Mary S.M. Ip, Jinping Zheng, Janet Stocks // *European Respiratory Journal*. – 2012. – № 40. – P. 1324-1343. – doi: 10.1183/09031936.00080312.
- 2 Philip H. Quanjer Age- and height-based prediction bias in spirometry reference equations / Philip H. Quanjer, Graham L. Hall, Sanja Stanojevic, Tim J. Cole, Janet Stocks // *European Respiratory Journal*. – 2012. – № 40. – P. 190-197. – doi: 10.1183/09031936.00161011.
- 3 Min J Joo Determinants of Spirometry Use and Accuracy of COPD Diagnosis in Primary Care / Min J Joo, David H Au, Marian L Fitzgibbon, Joanne McKell, Todd A Lee // *Journal of General Internal Medicine*. – 2011. – № 26. – 1272 p.
- 4 Сокол, Е. И. Спирометрия. Ее техническое обеспечение. Проблемы и перспективы / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Е. И. Король, Р. С. Томашевский // «Технічна електродинаміка» Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. – 2008. – № 3. – С. 119-124.
- 5 Degryse, J. Accuracy of Office Spirometry Performed by Trained Primary-Care Physicians Using the MIR Spirobank Hand-Held Spirometer / J. Degryse, J. Buffels, Van Dijk Y., M. Decramer, B. C. Nemery // *Respiration*. – 2012. – № 83. – P. 543-552. – doi:10.1159/00033490.
- 6 Kaufmann, M. Measuring FEV(6) for detecting early airway obstruction in the primary care setting. Quality and utility of the new PiKo-6 device / M. Kaufmann, S. Hartl, K. Geyer, M. Breyer, O. Burghuber // *Respiration*. – 2009. – № 78. – P. 161-167. – doi: 10.1159/000197466.
- 7 Сокол, Е. И. Цифровой портативный спирометр с турбинным преобразователем воздушного потока / Е. И. Сокол, А. В. Кипенский, Р. С. Томашевский, Е. И. Король // *Технічна електродинаміка*. Тематичний вип. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2011. – Ч. 2. – С. 299-304.
- 8 Enright, P. L. Office spirometers: the good, the bad, and the ugly / P. L. Enright, M. Swanney, D. Burton, G. Liistro // *The buyers' guide to respiratory care products*. – 2007. – P. 5-18.
- 9 Agarwal, V. Design and development of a low-cost spirometer with an embedded Web server / V. Agarwal, S. Ramachandran // *Int. J. Biomed. Eng. Technol.* – 2008. – vol. 1, no. 4. – P. 439-452. – doi: 10.1504/IJBET.2008.020072.
- 10 Кипенский, А. В. Импульсно-цифровые и цифро-импульсные преобразователи: Учебное пособие / А. В. Кипенский // Харьков: НТУ "ХПИ". – 2000. – 132 с.
- 11 Томашевский, Р. С. Улучшение технических показателей портативного спирометра с турбинным преобразователем потока / Р. С. Томашевский // *Прикладная радиоэлектроника*. – Харьков: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – 2010. – Т.9 №4. – С. 569-574.

### Bibliography (transliterated)

- 1 Philip H. Quanjer, Sanja Stanojevic, Tim J. Cole, Xaver Baur, Graham L. Hall, Bruce H. Culver, Paul L. Enright, John L. Hankinson, Mary S.M. Ip, Jinping Zheng, Janet Stocks The ERS Global Lung Function

- Initiative. *European Respiratory Journal*, 2012, **40**, 1324-1343, doi: 10.1183/09031936.00080312.
- 2 **Philip H. Quanjer, Graham L. Hall, Sanja Stanojevic, Tim J. Cole, Janet Stocks** Age- and height-based prediction bias in spirometry reference equations. *European Respiratory Journal*, 2012, **40**, 190-197, doi: 10.1183/09031936.00161011.
  - 3 **Min J Joo, David H Au, Marian L Fitzgibbon, Joanne McKell, Todd A Lee** Determinants of Spirometry Use and Accuracy of COPD Diagnosis in Primary Care. *Journal of General Internal Medicine*, 2011, **26**, 1272 p.
  - 4 **Sokol, Y., Kipenskyi, A., Korol, Y., Tomashevskiy, R.** Spirometry. Its technical support. Problems and Prospects *Technical electrodyamics*. Kiev, Institute of electrodyamics, 2008, **3**, 119-124.
  - 5 **Degryse, J., Buffels, J., Van Dijck Y., Decramer, M., Nemery, B. C.** Accuracy of Office Spirometry Performed by Trained Primary-Care Physicians Using the MIR Spirobank Hand-Held Spirometer. *Respiration*, 2012, **83**, 543-552, doi:10.1159/000334907.
  - 6 **Kaufmann, M., Hartl, S., Geyer, K., Breyer, M., Burghuber, O.** Measuring FEV(6) for detecting early airway obstruction in the primary care setting. Quality and utility of the new PiKo-6 device. *Respiration*, 2009, **78**, 161-167, doi: 10.1159/000197466.
  - 7 **Sokol, Y., Kipenskyi, A., Tomashevskiy, R., Korol, Y.** Digital portable spirometer turbocharged air flow transducer. *Technical electrodyamics*. Kiev, Institute of electrodyamics. 2011, **2**, 299-304.
  - 8 **Enright, P. L., Swanney, M., Burton, D., Liistro, G.** Office spirometers: the good, the bad, and the ugly. *The buyers' guide to respiratory care products*. 2007, 5-18.
  - 9 **Agarwal, V., Ramachandran, S.** Design and development of a low-cost spirometer with an embedded Web server. *Int. J. Biomed. Eng. Technol.*, 2008, **1**, 439-452, doi: 10.1504/IJBET.2008.020072.
  - 10 **Kipenskyi, A.** Pulse-to-digital and digital-to-pulse converters: Textbook, Kharkiv, 2000, 132 p.
  - 11 **Tomashevskiy, R.** Improving the technical performance of a portable spirometer with turbine flow transducer. *Applied electronics*, Kharkiv, 2011, **9**, 569-574.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Куліченко Вячеслав Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка» м. Харків, Україна; e-mail: kulichenko.emb@khp.edu.ua.

**Kulichenko Viacheslav** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: kulichenko.emb@khp.edu.ua.

**Томашевський Роман Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка» м. Харків, Україна; e-mail: tomashevskiy.emb@khp.edu.ua.

**Tomashevskiy Roman** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tomashevskiy.emb@khp.edu.ua.

**Макаров Валдим Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка» м. Харків, Україна; e-mail: vadimm@ukr.net.

**Makarov Vadim** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vadimm@ukr.net.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Куліченко, В. В.** Покращення енергетичних показників оптичного вимірювального каналу цифрового портативного спірометра / **В. В. Куліченко, Р. С. Томашевський, В. О. Макаров** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 53-59. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.08.

*Please cite this article as:*

**Kulichenko, V., Tomashevskiy, R., Makarov, V.** Improving the energy characteristics of optical measurement channel of digital portable spirometer. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2016, **25** (1197), 53-59, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.08.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Куліченко, В. В.** Улучшение энергетических показателей оптического измерительного канала цифрового портативного спирографа / **В. В. Куліченко, Р. С. Томашевський, В. А. Макаров** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 53-59. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.08.

**АННОТАЦІЯ** В статті розглянуті питання зниження енергопотреблення оптичного измерительного каналу турбинного преобразователя потока в цифровом портативном спиромере. Для этого в работе проанализировано функционирование турбинного спирометра и определены блоки с наибольшим энергопотреблением. В работе предложена и реализована новая функциональная схема оптического преобразователя на основе цифрового портативного спирометра ЦПС-14/1. Проведено исследование передаточной характеристики оптического измерительного канала и ее зависимости от внешних воздействий, таких как изменение освещения помещения и возникновения конденсата на поверхности турбины во время выдоха

**Ключевые слова:** оптический тахометр, спиромер, энергетические показатели, портативный прибор, внешнее освещение, турбинный преобразователь потока

Надійшла (received) 02.07.2016

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМИ МИКРОХИРУРГИЧЕСКИМИ ПИНЦЕТАМИ

А. В. ЛЕБЕДЕВ<sup>1\*</sup>, А. Г. ДУБКО<sup>2,1</sup>, С. О. ЯРОВАЯ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кафедра биомедицинской инженерии, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> Отдел «Сварка и родственные технологии в медицине и экологии», ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, УКРАИНА

\*email: o.lebediev@kpi.ua

**АННОТАЦИЯ** Микрохирургия представляет собой отдельный раздел хирургии, занимающийся оперативным лечением малых по размеру структур организма человека, которые зачастую недоступны невооруженному глазу. Все микрохирургические операции выполняются с использованием операционных микроскопов, миниатюрных хирургических инструментов. Пинцеты являются одним из самых важных инструментов при проведении микрохирургических вмешательств. Они удерживают мелкие участки тканей и очень тонкие шовные материалы при завязывании узлов. В Институте электросварки НАН Украины разработаны пинцеты для сварки тканей в микрохирургии. Целью исследования является создание модели сварки пинцетом, определение распределения механических напряжений в ткани в зависимости от силы сжатия электродов и механических свойств ткани, определение оптимальной формы браншей и электродов, рассмотрение влияния не параллельности электродов. Анализ и моделирование электрохирургического пинцета проводились с помощью комплекса SolidWorks. SolidWorks позволяет создавать конструкторскую документацию и проводить математическое моделирование сварки. В статье приведен метод математического моделирования микрохирургических пинцетов, необходимый для их проектирования. Были проанализированы резонансные частоты системы пинцет-ткань. При некоторых частотах электроды начинают скользить по ткани в противоположных направлениях, что уменьшает прочность шва. При определенных условиях возможна потеря устойчивости пинцета. Рассмотренное моделирование может быть полезно при проектировании обычных пинцетов.

**Ключевые слова:** SolidWorks, биполярный пинцет, сварка, модуль Юнга, перемещение, деформация, резонанс.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE RESISTANCE WELDING OF LIVING TISSUES BY THE SPECIALIZED MICROSURGICAL TWEEZERS

A. LEBEDEV<sup>1\*</sup>, A. DUBKO<sup>2,1</sup>, S. YAROVAYA<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Department of Biomedical Engineering, National Technical University of Ukraine «KPI», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology, E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine

**ABSTRACT** Microsurgery is a separate surgery section, dealing with surgical treatment of small size structures of the human body, which are often not available to the naked eye. The operating microscope and miniature surgical instruments perform all microsurgical operations. Tweezers is one of the most important tools in conducting microsurgical operations. They hold small portions of tissue and very thin sutures for tying knots. The Paton Welding Institute designed tweezers for welding tissue in microsurgery. The aims of the study are: to create a model of welding tweezers; to determine of the distribution of mechanical stresses in the tissue, depending on the compression force of the electrodes and mechanical properties of the tissue; to determine the optimal shape of the jaws and electrodes; to consider the influence of the angle between the electrodes at the welding. 3D CAD Packages SolidWorks performed analysis and modeling of electrosurgical forceps. SolidWorks allows to create design documentation and to perform mathematical modeling of welding. The paper presents a method of mathematical modeling of microsurgery tweezers, needed for their design. The electrodes should converge at an angle for secure grasping of the tissue. The angle between the electrodes reverses upon further compression, leading to expulsion of tissue. The resonant frequency of the system forceps-tissue analyzed. The electrodes glide over the tissue in opposite directions at certain resonant frequencies, which reduces the strength of the welding. Tweezers can become unstable under certain conditions. Modeling can be useful in the design of conventional tweezers.

**Keywords:** SolidWorks, bipolar forceps, welding, Young's modulus, displacement, deformation, resonance.

### Введение

В Институте электросварки НАН Украины проводится научная работа по разработке большого количества электрохирургических инструментов для сварки живых биологических тканей (БТ) в хирургии [1-7]. В особом ряду находится разработка микрохирургических пинцетов. Такие пинцеты используются в исследованиях по соединению нервов

с помощью тканесохраняющей высокочастотной электросварочной технологии [8-10]. При проектировании этих инструментов математическое моделирование позволяет определить напряжения, деформации и смещения БТ. Представляет интерес надежность фиксации электродом ткани. Следует определить условия резонанса системы: "рука хирурга - пинцет - свариваемая ткань". В микрохирургическом пинцете не используется направляющий,

изолированный штырь между браншами. Поэтому при сжатии электроды могут смещаться. В этом случае сварки не происходит, а будет разрезание БТ.

### Цель работы

Создание модели сварки пинцетом, определение распределения механических напряжений в ткани в зависимости от силы сжатия электродов и механических свойств ткани, определение оптимальной формы браншей и электродов, рассмотрение влияния не параллельности электродов.

### Изложение основного материала

Анализ и моделирование электрохирургического пинцета проводились с помощью комплекса SolidWorks (рис.1). Бранши пинцета сделаны из нержавеющей стали с модулем Юнга  $2e^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициентом Пуассона – 0,28. Длина пинцета – 90 мм. Электроды имеют квадратное поперечное сечение, длина стороны квадрата – 0,5 мм. Биологическая ткань имеет модуль Юнга  $1,2e^5$  Па, коэффициент Пуассона – 0,39.

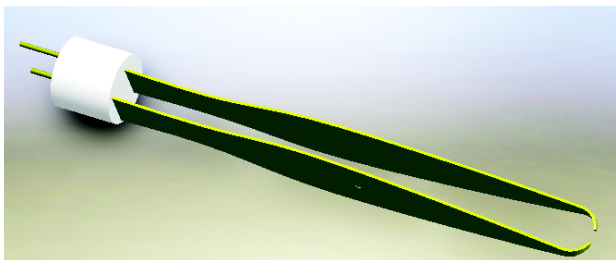


Рис. 1 – 3D модель пинцета для микросварки, выполненная в SolidWorks.

При моделировании определялись:

1. механические напряжения в ткани;
2. условия фиксации пинцетом ткани;
3. резонансные частоты;
4. устойчивость системы при отсутствии

направляющего, изолированного штыря между браншами для предотвращения соскальзывания электродов.

Толщина ткани – 0,1 мм. Бранши сжимают ткань симметрично, поэтому для упрощения расчетов моделирование выполнялось для одной бранши и половины толщины ткани. Моделирование выполнялось для усилий сжатия бранш: 0,5; 1 и 2 Н.

### Обсуждение результатов

При силе сжатия 0,5; 1 и 2 Н в результате деформации браншей меняется знак угла наклона электродов (рис. 2, 3, 4). Электрод перестает фиксировать ткань, а наоборот - начинает выталкивать ткань от себя.

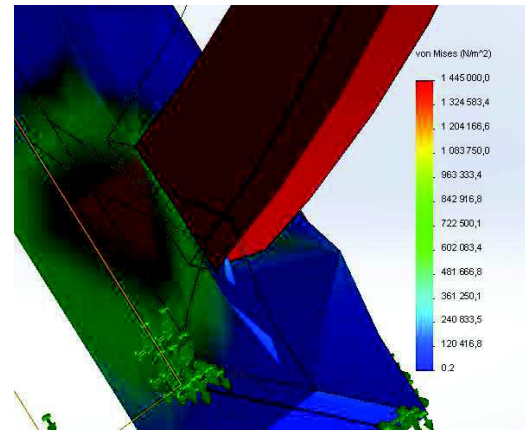


Рис. 2 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 2 Н

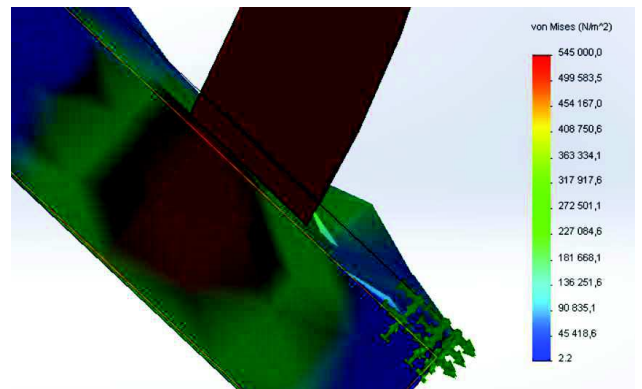


Рис. 3 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 1 Н

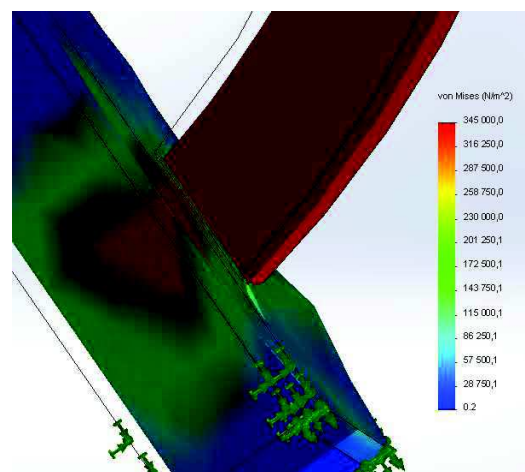


Рис. 4 – Напряжение в электроде и ткани после сжатия силой 0,5 Н

Максимальное напряжение зависит от усилия сжатия примерно пропорционально. Проведенные ранее исследования показали, что для надежной сварки удельное давление электродов на ткань должен находиться в диапазоне 1-2 Н/м<sup>2</sup>. При усиллии

2 Н напряження в сварочной ткани находится в пределах 0,9-1,45 Н/мм<sup>2</sup>, что обеспечивает хорошие условия для сварки. При усилии 0,5 Н напряження в сварочной ткани находится в пределах 0,345-0,170 Н/мм<sup>2</sup>, что недостаточно. SolidWorks позволяет строить изоповерхности, которые объединяют точки с одинаковым значением механических напряжений (рис. 5-7).

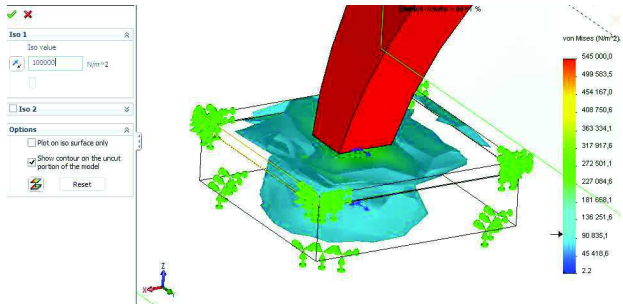


Рис. 5 – Изоповерхности напряжения 0,1 Н/мм<sup>2</sup>

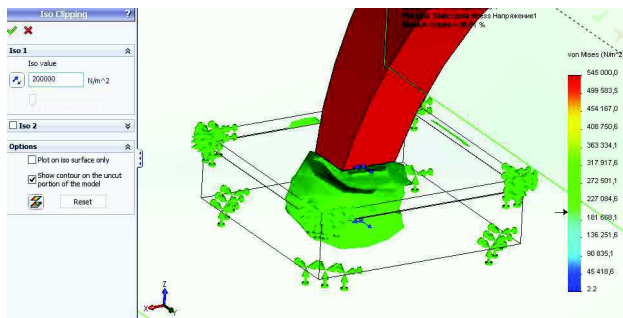


Рис. 6 – Изоповерхности напряжения 0,2 Н/мм<sup>2</sup>

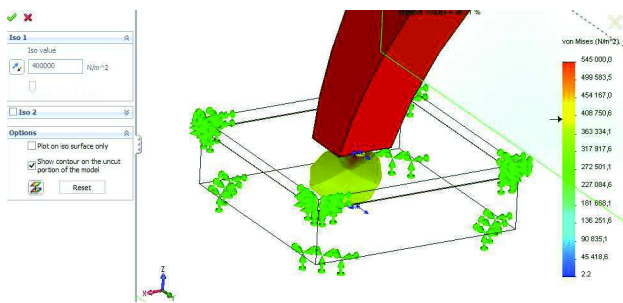


Рис. 7 – Изоповерхности напряжения 0,4 Н/мм<sup>2</sup>

Расчёты при силе сжатия браншей 1Н приведены на рис. 5-7. Напряжения распределяются неравномерно в свариваемой ткани.

Исследованы деформации ткани вокруг электродов при различных усилиях сжатия пинцета. Деформация измеряется величиной ESTR - отношением размеров БТ при нагрузке к первоначальным. Максимальная деформация 0.296. означает, что размер ткани изменяется почти в 3 раза (рис. 8-10).

На рис. 8-10 коэффициент отображения деформации равен 22. Реальная деформация в 22 раза меньше, чем изображена на рисунках. Большие деформации ткани вокруг электрода приводят к остаточным деформациям и напряжениям, неблагоприятно сказываются на прочности шва.

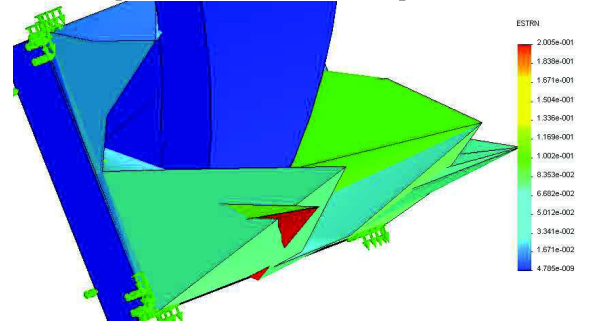


Рис. 8 – Деформация при силе сжатия браншей 0,5Н

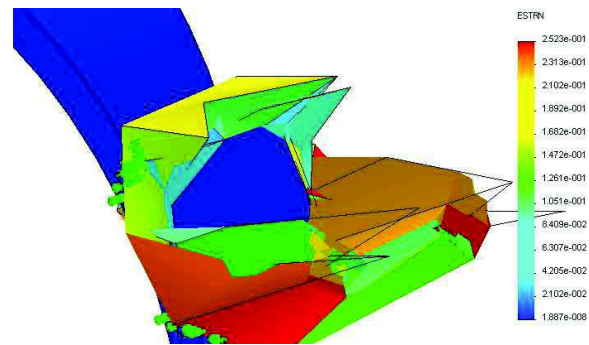


Рис. 9 – Деформация при силе сжатия 1Н

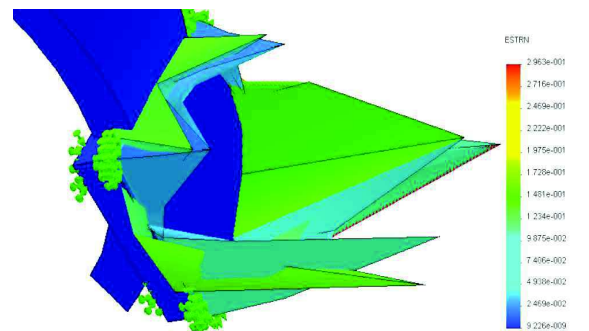


Рис. 10 – Деформация при силе сжатия 2Н

Сварочное напряжение может модулироваться с частотой несколько килогерц. Электромагнитные силы, действующие на бранши, вызывают вибрации электродов. Комплекс SolidWorks позволяет рассчитать все резонансные частоты и соответствующие траектории движения биологической ткани (рис. 11-14).

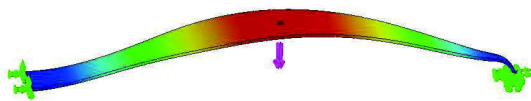
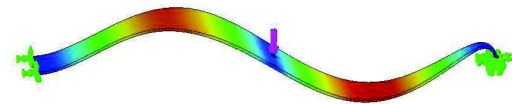
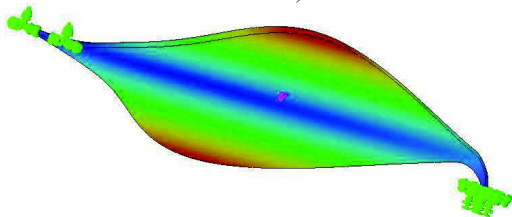


Рис. 11 – Траектория движения в увеличенном масштабе при резонансной частоте 275 Гц

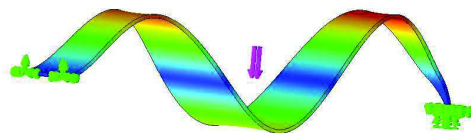


а)

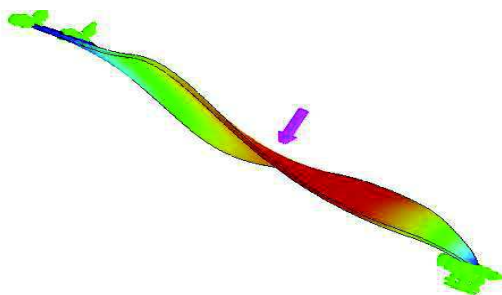


б)

Рис. 12 – Траектории движения в увеличенном масштабе при резонансных частотах:  
а) 869 Гц; б) 1441 Гц



а)



б)

Рис. 13 – Траектория движения в увеличенном масштабе при резонансных частотах:  
а) 1800 Гц; б) 2505 Гц

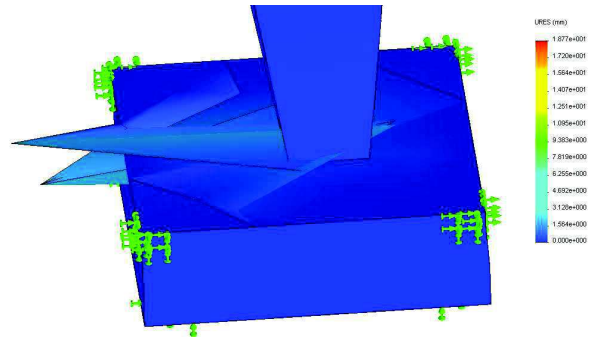


Рис. 14 – Потеря устойчивости пинцета при усилии сжатия 1 Н

Если частота пачек напряжения будет близка к резонансной частоте, то место сварки будет отклоняться с увеличенной амплитудой и двигаться по сложной траектории, что влияет на прочность шва.

В пинцете не используется изолированный штырь между браншами. Поэтому при сжатии, бранши могут перекрестываться. В этом случае сварки не происходит, а будет разрезания ткани.

Из рис. 14 следует, что бранши могут соскользнуть в разные стороны и вместо сварки будет повреждение ткани.

#### Выводы

1. Создана модель пинцета для микросварки. Модель может быть использована для анализа и проектирования пинцетов других типов.
2. Получены распределения напряжения, деформации, перемещения ткани и браншей.
3. Для надежной фиксации ткани электроды сходятся под углом. При дальнейшем сжатии знак угол между электродами изменяется на противоположный, что приводит к выталкиванию ткани.
4. Проанализированы резонансные частоты системы пинцет-ткань. Показано, что при некоторых резонансных частотах электроды начинают скользить по ткани в противоположных направлениях, что снижает прочность шва.
5. При определенных условиях возможна потеря устойчивости пинцета.

#### Список литературы

- 1 Paton, B. E. Electric welding of soft tissues in surgery / B. E. Paton // *The Paton Welding Journal*. – 2004. – № 9. – P. 6-10.
- 2 Paton, B. E. Welding and related technologies for medical application / B. E. Paton // *The Paton Welding Journal*. – 2008. – № 11. – P. 11-19.
- 3 Патон, Б. Е. Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия / под ред. Б. Е. Патона, О. Н. Ивановой // *Киев: Наукова думка*. – 2009. – 200 с.
- 4 Dubko, A. G. Mathematical methods of research of the electric welding of soft biological tissues / A. G. Dubko, A.

- V. Lebedev, E. G. Lopatkina // *11th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012)*. Lviv – Slavske, Ukraine. – 2012. – 226 p.
- 5 **Linchevskyy, O.** Lung sealing using the tissue-welding technology inspontaneous pneumothorax / **O. Linchevskyy, A. Makarov, V. Getman** // *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*. – 2010. – № 5. – P. 1126-1128. – doi: 10.1016/j.ejcts.2009.11.017.
  - 6 **Umanets, N. N.** High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery / **N. N. Umanets, N. V. Pasychnikova, V. A. Naumenko, P. B. Henrich** // *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. – 2014. – №11. – P. 1697-1703. – doi: 10.1007/s00417-014-2709-0.
  - 7 **Sydorets, V.** Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery / **V. Sydorets, A. Lebedev, A. Dubko** // *16<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 1697-1703. – doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379
  - 8 **Корсак, А. В.** Особливості регенерації та макроскопічного стану травмованого периферійного нерва за умов застосування ВЧ – електрозварювальної технології та біполярних інструментів під час оперативного лікування в експерименті / **А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, В. В. Ліходівський, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк** // *Восьмая международная научно – практическая конференция. Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы*. – Киев, – 2013. – С. 39-40.
  - 9 **Корсак, А. В.** Морфологічна характеристика мікрооточення нейротів рухового центру травмованого сідничного нерву за умов впливу високочастотної – електрозварювальної технології / **А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, С. М. Чухрай, Н. В. Ритківа, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк** // *Вісник Вінницького національного медичного університету*. – 2014. – №2. Т.18. – С. 379- 383.
  - 10 **Корсак, А. В.** Нейрогліальні взаємовідношення рухового та чутливого центру травмованого сідничного нерва за умов впливу високочастотної електрозварювальної технології / **А. В. Корсак, Ю. Б. Чайковський, В. В. Ліходівський, С. М. Чухрай, Г. С. Маринський, О. В. Чернець, К. Г. Лопаткіна, В. А. Васильченко, Д. Ф. Сидоренко, Ю. З. Буряк, В. К. Сердюк** // *Девятая международная научно – практическая конференция. «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы*. – Киев. – 2014. – С. 27.
  - 4 **Dubko, A. G., Lebedev, A. V., Lopatkina, E. G.** Mathematical methods of research of the electric welding of soft biological tissues. *11th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2012)*. Lviv – Slavske, Ukraine, 2012, 226 p.
  - 5 **Linchevskyy, O., Makarov, A., Getman, V.** Lung sealing using the tissue-welding technology inspontaneous pneumothorax. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 2010. 5. 1126-1128, doi: 10.1016/j.ejcts.2009.11.017.
  - 6 **Umanets, N. N., Pasychnikova, N. V., Naumenko, V. A., Henrich, P. B.** High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2014, 11, 1697-1703, doi: 10.1007/s00417-014-2709-0.
  - 7 **Sydorets, V., Lebedev, A., Dubko, A.** Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. *16<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine, 2015, 1697-1703, doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.
  - 8 **Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Likhodievskyy, V. V., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K.** Osoblyvosti regeneratsii ta makroskopichnogo stanu travmovanogo peripherynogo nerva za umov zastosuvannya VCH – elektrozvaryuvalnoi tekhnologii ta bipolyarnykh instrumentiv pid chas operatyvnogo likuvannya v eksperymenti [Features regeneration and macroscopic state of the injured peripheral nerve in conditions of the RF - electric welding technology and bipolar instruments during surgery experiment]. *Vosmaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Svarka i termicheskaya obrabotka zhyvykh tkanei. Teoriya. Praktika. Perspektivy* [Eighth International scientific - practical konferentsiya. Welding and heat treatment of the living tissue. Theory. Practice. prospects]. Kyev, 2013, 39-40.
  - 9 **Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Chukhray, S. M., Rytynikova, N. V., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K.** Morfologichna kharakteristika mikrootochennya neirotsitiv ruhovogo tsentru travmovanogo sidnichnogo nervu za umov vplyvu vysokochastotnoi-elektrozvaryuvalnoi tekhnologii [Morphological characteristics microenvironment neyrotsyiv motor center injured sciatic nerve under conditions of high-impact - electric welding technology]. *Visnyk Vinnitskogo natsionalnogo medychnogo universitetu [Bulletin of the Vinnitsa National Medical University]*, 2014, 2(18), 379-383.
  - 10 **Korsak, A. V., Chaykovckyy, Y. B., Likhodievskyy, V. V., Chukhray, S. M., Marynskiy, G. S., Chernets, O. V., Lopatkina, K. G., Vasilchenko, V. A., Sidorenko, D. F., Buryak, V. Z., Serdiuk, V. K.** Neuroglialni vzaemovidnoshennya ruhovogo ta chutlyvogo tsentru travmovanogo sidnychnogo nerva za umov vplyvu vysokochastotnoi elektrozvaryuvalnoi tekhnologii [Neuroglial relationship between the motor and the sensitive injured sciatic nerve center for high-impact conditions of electric welding technology]. *Devyataya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Svarka i termicheskaya obrabotka zhyvykh tkanei. Teoriya. Praktika. Perspektivy* [Ninth international scientific - practical

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Paton, B. E.** Electric welding of soft tissues in surgery. *The Paton Welding Journal*, 2004, 9, 6-10.
- 2 **Paton, B. E.** Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, 11, 11-19.
- 3 **Paton, B. E., Ivanova O. N.** Tkanesokhranyayushchaya vysokochastotnaya elektrosvarohnaya khyrurhyaya [Tkanesohranyayushchaya high frequency electrowelding Surgery]. Kyev: *Naukova dumka*, 2009, 200 p.



*conference. Welding and thermal treatment of living tissues.  
Theory. Practice. Perspectives]. Kyev, 2014, 27.*

#### Сведения об авторах (About authors)

**Лебедев Алексей Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: o.lebediev@kpi.ua.

**Alexei Lebedev** – doctor of technical Sciences, Professor of the Department of biomedical engineering of the National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: o.lebediev@kpi.ua.

**Дубко Андрей Григорьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, отдел «Сварка и родственные технологий в медицине и экологии», ИЭС им. Е.О. Патона; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», доцент кафедры биомедицинской инженерии, проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: andreyies17@gmail.com.

**Andrey Dubko** – Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist, Department of Welding and Related Technologies in Medicine and Ecology, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine; Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: andreyies17@gmail.com.

**Яровая Светлана Олеговна.** – магистр кафедры биомедицинской инженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», студент, проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: lac360yarova.ru@mail.ru

**Svetlana Yarovaya** – master of the Department of biomedical engineering of the National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Prospekt Pobedy, 37, Kiev, Ukraine, e-mail: lac360yarova.ru@mail.ru

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Лебедев А. В.** Математическое моделирование контактной сварки живых тканей специализированными микрохирургическими пинцетами / **А. В. Лебедев, А. Г. Дубко, С. О. Яровая** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

*Please cite this article as:*

**Lebedev, A., Dubko, A., Yarovaya, S.** Mathematical modeling of the resistance welding of living tissues by the specialized microsurgical tweezers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 60-65, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Лебедев, О. В.** Математичне моделювання контактної зварювання живих тканин спеціалізованими мікрохірургічними пінцетами / **О. В. Лебедев, А. Г. Дубко, С. О. Яровая** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.09.

**АНОТАЦІЯ** Мікрохірургія є окремим розділом хірургії, що займається оперативним лікуванням малих за розміром структур організму людини, які найчастіше недоступні неозброєному оку. Всі мікрохірургічні операції виконуються з використанням операційних мікроскопів, мініатюрних хірургічних інструментів. Пінцети є одним з найважливіших інструментів при проведенні мікрохірургічних втручань. Вони утримують дрібні ділянки тканин і дуже тонкі шовні матеріали при зав'язуванні вузлів. В Інституті електрозварювання НАН України розроблено пінцети для зварювання тканин в мікрохірургії. У статті наведено метод математичного моделювання таких пінцетів, необхідний для їх проектування. Моделювання може бути корисним при проектуванні звичайних пінцетів.

**Ключові слова:** SolidWorks, біполярний пінцет, зварювання, модуль Юнга, переміщення, деформація, резонанс.

*Поступила (received) 04.06.2016*

УДК 658.513.012.12

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.10

**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКА ОТКАЗА ПОДСИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК»****С. К. МЕЩАНИНОВ\*, А. В. ЛЬДОВСКАЯ***Кафедра электроники, Днепродзержинский государственный технический университет, Каменское (Днепродзержинск), УКРАИНА**\*email: sergey.meshaninov@mail.ru, sergey.meshaninov@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** Предложен набор информативных параметров оценки психофизиологического состояния человека. На основе использования математического аппарата нечеткой логики разработана модель риска отказа подсистемы «человек» человеко-машинной системы. На основе этой модели может быть разработана математическая модель оценки риска отказа человеко-машинной системы и, соответственно, в дальнейшем, имитационная компьютерная модель оценки риска отказа подсистемы «Человек».

**Ключевые слова:** Человеко-машинная система, мониторинг, психофизиологическое состояние, нечеткая логика, математическая модель, человек-оператор

**MODEL ASSESSMENT OF RISK OF FAILURE SUBSYSTEM "MAN"****S. K. MESHCHANINOV\*, A. V. L'DOVSKAIA***Department of Electronics, Dniprodzherzhynsk State University of Technology, Kamenskoye (Dneprodzerzhinsk), UKRAINE**\*email: sergey.meshaninov@mail.ru*

**ABSTRACT** There are proposed the method of diagnostics of psychophysiological state of human-operator. There are presented the rationale the choose of informative parameters for evaluation of the psychophysiological state of man. On the basis of the using the mathematical apparatus of fuzzy logic model there are developed by the risk of failure of the subsystem "man" of man-machine system. In the form of a flowchart presents the analysis process incoming to the monitoring/control system, signals (biometric data) about the psychophysical state of the human-operator. One of the parameter groups characterizing the psychophysiological state of human-operator, who, to date, relatively often used in monitoring systems are the parameters of functioning of the human's body. To assess the risk of failure of the system quantitatively and qualitatively, it is necessary to produce aggregated data collected as part of the tree hierarchy, while aggregation is done in the direction of the arcs of the graph hierarchy. The choice of this group of parameters is due, primarily to the fact that their control is easy to provide the contactless research methods. The latter fact is important, because the current production, as well as in everyday life or in training or competition modes athletes are almost always not possible to attach the sensors directly to the human body. The mathematical description of the calculation of risk, given the uncertainty and inaccuracy of the identification of the factors, the large number of assumptions and estimates, based on the theory of fuzzy sets, and suggests one solution algorithm problems, different in their original parametric data. On the basis of use the mathematical apparatus of fuzzy logic has been developed model for calculating the risk of failure of the subsystem "human" human-machine system. A mathematical model of risk assessment of failure of man-machine system and, consequently, in the future, a computer simulation model for evaluating the risk of failure of the subsystem "Man" can be developed on based of this model.

**Keywords:** Human-machine system, monitoring psychophysiological state, fuzzy logic, mathematical model, man-operator.

**Введение**

В настоящее время в связи с интенсификацией производства всё большим внедрением более сложной техники во все сферы жизнедеятельности человека все более остро возникает необходимость обеспечить безотказную работу машин и различного рода технологического и иного оборудования в различных сферах человеческой деятельности. Все эти негативные проявления, используя технические термины, можно назвать сбоем системы «Человек – Машина - Среда» (ЧМС).

При этом, если вероятность такого сбоя может быть определена на основе данных контроля и прогноза эволюции технического состояния ЧМС и ее элементов, и, в этом случае могут быть приняты определенные меры предосторожности, то, в случае неожиданного отказа системы ЧМС, как правило,

возникают крайне негативные экономические, социальные и экологические последствия, избежать которых без проведения предварительных исследований и осуществления мониторинга состояния системы ЧМС в режиме реального времени не представляется возможным.

**Постановка задачи**

На сегодняшний день, подсистема «Человек» системы ЧМС, является, на наш взгляд наиболее уязвимым звеном, что обусловлено наибольшей непредсказуемостью функционирования человеческого организма, в первую очередь, его психики, или, как принято сейчас говорить, нестабильностью его психофизиологического состояния (ПС). Исследованиям влияния «человеческого фактора» на надежность

функционирования современного производства посвящены многие работы, к примеру, в [1 - 3].

**Цель работы**

Таким образом, **целью настоящей работы** является разработка модели оценки риска отказа подсистемы «человек».

Существует довольно большое количество систем предназначенных для диагностики ПС, либо позволяющих ее проводить (системы Mind Reader, Барьер, Крис, Поларг и др). Регулярно появляются новые системы психофизиологической диагностики. Однако ни одна из них не способна выполнять контроль ПС в соответствии со всеми требованиями. Все комплексы осуществляют лишь периодический контроль с довольно большим периодом (от одной до нескольких десятков минут), не позволяющим отслеживать ПС человека в реальном масштабе времени. В большинстве систем используются методики, требующие отрыва обследуемых от работы, либо ограничивающие их возможности.

Одним из основных трудностей на пути к созданию требуемой системы связаны со спецификой

регистрируемой информации. Измеряемые параметры с одной стороны слабо коррелированы, а с другой их значения многомодальны и переменны от индивидуума к индивидууму. По этой причине возникают сложности при математической обработке и принятии решений.

Одной из групп параметров, характеризующих ПС человека, которые, на сегодняшний день сравнительно часто используются в системах мониторинга, являются параметры функционирования органа зрения человека. Выбор данной группы параметров обусловлен, в первую очередь тем, что их контроль легко обеспечить с использованием бесконтактных методов исследований. Последнее обстоятельство весьма важно, так как на современном производстве, а также в повседневной жизни или в режимах тренировок или соревнований спортсменов практически всегда отсутствует возможность прикрепить датчики непосредственно к телу человека.

На рис. 1 показана блок-схема анализа поступающих в контролирующие-управляющую систему сигналов биометрической информации о ПС человека-оператора.



Рис. 1 – Блок-схема анализа поступающих в контролирующие-управляющую систему сигналов биометрической информации о ПС человека-оператора

Математическое описание расчета рисков, учитывая неопределенность и неточность идентификации их факторов, наличие большого

количества предположений и допущений, базируется на теории нечетких множеств [4, 5, 6] и предполагает решение одним алгоритмом задач, различных по своим

исходным параметрическим данным. Воспользуемся далее результатами работ [7, 8, 9].

Может быть предложена следующая последовательность действий:

1. Выбрать оцениваемый вид риска (рис. 1) и уточнить количественные или качественные факторы (параметры)  $C_i$ , используемые для его описания. Каждый фактор представить в виде лингвистической переменной, имеющей свой носитель  $X$  (единицу измерения) со своей областью определения на вещественной оси.

2. На выбранном носителе определить лингвистическую переменную вида «Уровень фактора  $X$ », которая обладает трехуровневым («Низкий», «Средний», «Высокий») терм-множеством значений (шкалой).

3. Для каждого значения лингвистической переменной «Уровень фактора  $X$ » определить численные значения удельных весов  $p_i$ , используя методы:

- пропорциональности:

$$p_i = \frac{2(N - i + 1)}{(N + 1)N}, \quad (1)$$

- равно значимости:  $p_i = 1/N$  (2)

4. Каждому значению лингвистической переменной «Уровень фактора  $X$ » экспертным путем поставить в соответствие стандартный нечеткий 01-классификатор и функцию принадлежности  $\mu_i(x_i)$  (рис. 2).

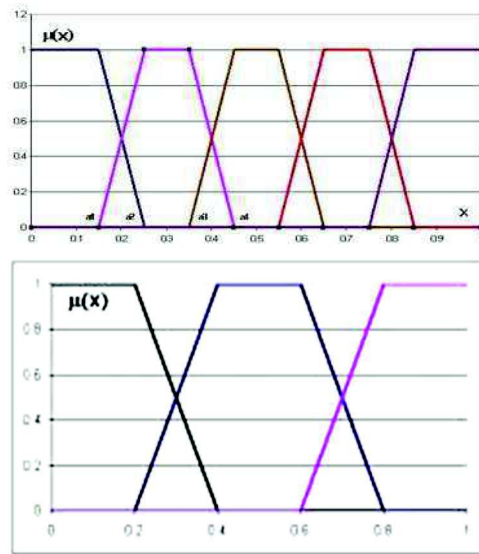


Рис. 2 – Стандартные пяти- и трехуровневый нечеткие 01-классификаторы

5. Составить матрицу для оценки показателя агрегированного (в рамках вида) риска (табл. 1).

6. Решить матрицу (табл. 1), определив численное значение показателя агрегированного риска  $A_i$ :

$$A_i = \sum_{i=1}^N p_i \sum_{j=1}^5 a_j \mu_{ij}(x_i) \quad (3)$$

Таблица 1 – Матрица для оценки агрегированного показателя риска

| Факторы риска       | Значимости (веса) Факторов, $p_i$ | Функции принадлежности для уровней факторов риска |                  |                   |                   |                         |
|---------------------|-----------------------------------|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
|                     |                                   | «Очень низкий» $\mu_1$                            | «Низкий» $\mu_2$ | «Средний» $\mu_3$ | «Высокий» $\mu_4$ | «Очень высокий» $\mu_5$ |
| C1                  | 0.4                               | 0   | 0.5              | 0.5               | 0                 | 0                       |
| C2                  | 0.1                               | 1   | 0                | 0                 | 0                 | 0                       |
| C3                  | 0.3                               | 0   | 0                | 1                 | 0                 | 0                       |
| $C_i$               | 0.2                               | 0   | 0.5              | 0.5               | 0                 | 0                       |
| Узловые точки $a_j$ |                                   | 0.1   | 0.3              | 0.5               | 0.7               | 0.9                     |

7. Воспользовавшись стандартным 01-классификатором осуществить контроль (распознавание уровня) полученного значения агрегированного риска  $A_i$ .

8. Определить численное значение интегральных показателей рисков  $R_{out}$ :

$$R_{out} = \sum_{i=1}^M (A_i * w_i) \quad (4)$$

9. Воспользовавшись стандартным 01-классификатором осуществить контроль (распознавание уровня) полученных численных значений показателей рисков  $R_{out}$  (табл. 2).

### Модель риска отказа подсистемы «человек»

Пусть имеется математическая модель риска отказа подсистемы «человек», далее именуемая А-моделью:

$$A = \langle F, U, P \rangle, \quad (5)$$

где  $F$  - древовидная иерархия факторов отказа;  $U$  - набор качественных оценок уровней каждого фактора в иерархии;  $P$  - система отношений предпочтения одних факторов другим для одного уровня иерархии факторов. При этом:

$U = \{\text{Низкий уровень (Н), Средний уровень (С), Высокий уровень (В)}\}$ ,

$$P = \{F_i (\varphi) F_j \mid \varphi \in (\prec, \approx)\}, \quad (6)$$

где  $\prec$  - отношение предпочтения,  $\approx$  - отношение

Таблиця 2 – Классификация уровня интегрального показателя риска Rout на основе стандартного трехуровневого нечеткого 01-классификатора

| Интервал значений Rout | Классификация уровня параметра | Степень оценочной уверенности (функция принадлежности) |
|------------------------|--------------------------------|--|
| $0 < Rout \leq 0.2$    | Rout_1                         | 1  |
| $0.2 < Rout \leq 0.4$  | Rout_1                         | $\mu_1 = 5 * (0.4 - Rout)$                             |
|                        | Rout_2                         | $\mu_2 = 1 - \mu_1$                                    |
| $0.4 < Rout \leq 0.6$  | Rout_2                         | 1  |
| $0.6 < Rout \leq 0.8$  | Rout_2                         | $\mu_2 = 10 * (0.8 - Rout)$                            |
|                        | Rout_3                         | $\mu_3 = 1 - \mu_2$                                    |
| $0.8 < Rout \leq 1.0$  | Rout_3                         | 1  |

безразличия.

В свою очередь, древовидная иерархия F может быть описана ориентированным графом без циклов, петель, горизонтальных ребер в пределах одного уровня ранжирования, содержащим одну корневую вершину:

$$F = \langle \{F_i\}, \{V_{ij}\} \rangle, \quad (7)$$

где  $\{F_i\}$  – множество вершин факторов,  $\{V_{ij}\}$  – множество дуг,  $F_0$  – корневая вершина, отвечающая риск-фактору системы в целом. При этом в древовидном графе дуги расположены так: началу дуги соответствует вершина нижнего уровня иерархии (ранга), а концу дуги – вершина ранга, на единицу меньшего (рис. 1).

Простейший пример, соответствующий иерархии вида рис. 3.

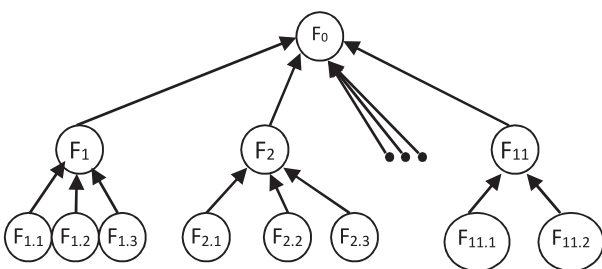


Рис. 3 – Древовидная иерархия F

$F = \langle$   
 $\{$   
 $F_0$  – система ЧМС в целом;  
 $F_1$  – Ширина открытия глаз;  
 $F_{1.1}$  – Меньше нормы по причине усталости;  
 $F_{1.2}$  – Больше нормы по причине усталости;  
 $F_{1.3}$  – Больше нормы по причине сбоя техники;  
 $F_2$  – Размеры зрачка;  
 $\dots$

$F_{11}$  – Пол;  
 $\};$   
 {связь вершин в графе отображается нумерацией вершин, в соответствии с занимаемым вершиной уровнем иерархии}>.

Разумеется, пример (7) можно сколько угодно расширять, добавляя к графу F новые узлы и дуги. Необходимо еще наложить на эту иерархию систему отношений предпочтений P (рис. 4)

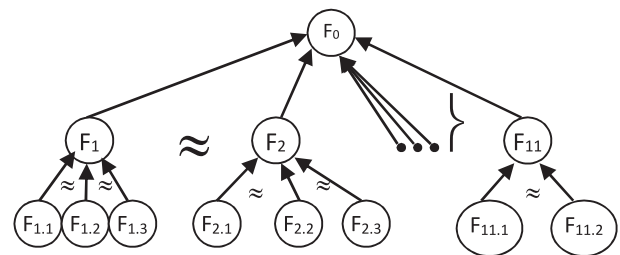


Рис. 4 – Иерархия F с наложенной на нее системой P

Рис. 4 соответствует система отношений P:  
 $\Phi = \{ \Phi_1 \approx \Phi_2 \sim \Phi_{11} \} \Phi_2 \} \Phi_1 \sim \Phi_{1.1} \approx \Phi_{1.2} \approx \Phi_{1.3} \sim \Phi_{2.1} \approx \Phi_{2.2} \approx \Phi_{2.3}; \Phi_{11.1} \approx \Phi_{11.2} \}$  (8)

#### Метод оценки риска отказа системы

Чтобы произвести оценку риска отказа системы количественно и качественно, необходимо произвести агрегирование данных, собранных в рамках древовидной иерархии; при этом агрегирование совершается по направлению дуг графа иерархии.

Для агрегирования можно использовать матричную схему, описанную в [9, 10], с той лишь разницей, что агрегированию будет подлежать не отдельное значение выбранной функции принадлежности в структуре лингвистической переменной «Уровень фактора», а вся функция принадлежности целиком. В этом случае для агрегирования применяется ОWA-оператор Ягера [10], причем весами в свертке выступают коэффициенты Фишберна (OWA -Ordered Weighted Averaging – осреднение с упорядоченными весами).

Раскроем сказанное выше. Сформируем лингвистическую переменную «Уровень фактора» с терм-множеством значений U вида (6). Тогда в качестве семейства функций принадлежности может выступать стандартный трёхуровневый 01-классификатор [11], где функции принадлежности – трапециевидные треугольные числа (рис. 3):

$$N: \mu_1(x) = \begin{cases} 1, 0 \leq x < 0.2 \\ 5(0.4 - x), 0.2 \leq x < 0.4 \\ 1, 0.4 \leq x \leq 1 \\ 0, 0 \leq x < 0.2 \end{cases}$$

$$C: \mu_2(x) = \begin{cases} 5(x - 0.2), 0.2 \leq x < 0.4 \\ 1, 0.4 \leq x < 0.6 \\ 5(0.8 - x), 0.6 \leq x < 0.8 \\ 0, 0.8 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$B: \mu_3(x) = \begin{cases} 0,0 \leq x < 0,6 \\ 5(x - 0,6), 0,6 \leq x < 0,8 \\ 1, 0,8 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Везде в (9)  $x$  – это 01-носитель (отрезок  $[0,1]$  вещественной оси).

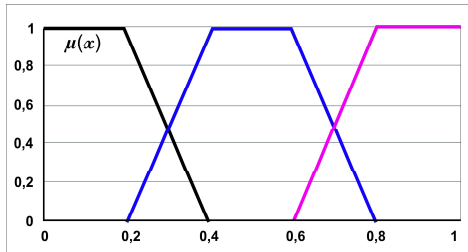


Рис. 5 – Система трапецевидных функций принадлежности на 01-носителе

Стандартный классификатор осуществляет проекцию нечеткого лингвистического описания на 01-носитель, при этом делает это непротиворечивым способом, симметрично располагая узлы классификации (0.1, 0.5, 0.9). В этих узлах значение соответствующей функции принадлежности равно единице, а всех остальных функций – нулю. Неуверенность эксперта в классификации убывает (возрастает) линейно с удалением от узла (с приближением к узлу, соответственно); при этом сумма функций принадлежности во всех точках носителя равна единице.

Как хорошо известно [9 – 11], системе убывающего предпочтения  $N$  альтернатив наилучшим образом отвечает система снижающихся по правилу арифметической прогрессии весов:

$$P_i = \frac{2(N-i+1)}{(N+1)N}, i = 1..N, \quad (10)$$

а системе безразличных друг другу  $N$  альтернатив – набор равных весов

$$p_i = N^{-1}, i = 1..N. \quad (11)$$

Из (10) видно, что веса Фишберна – это рациональные дроби, в знаменателе которых стоит сумма арифметической прогрессии  $N$  членов первых членов натурального ряда с шагом 1, а в числителе – убывающие на 1 элементы натурального ряда, от  $N$  до 1 (например,  $3/6, 2/6, 1/6$ , в сумме единица). То есть предпочтение по Фишберну выражается в убывании на единицу числителя рациональной дроби весового коэффициента более слабой альтернативы.

Чтобы определить набор весов Фишберна для смешанной системы предпочтений, когда, наряду с предпочтениями, в систему входят отношения безразличия, необходимо определять числители  $r_i$  рациональных дробей по рекурсивной схеме:

$$r_{i-1} = \begin{cases} r_i, F_{i-1} \approx F_i \\ r_i + 1, F_{i-1} \} F_i \end{cases}, r_N = 1, i = N..2. \quad (12)$$

Таким образом, предложенная здесь система весов Фишберна для смешанных систем предпочтений

является непротиворечивой и обобщает частные случаи известных систем (10) и (11). Для иллюстрации в таблицу 3 сведены дроби Фишберна для всех смешанных систем отношений предпочтения при  $N=2..4$ .

Таблица 3 – Система весов Фишберна ( $N=2..4$ )

| N                 | Φ                 | p1   | p2   | p3   | p4  |
|-------------------|-------------------|------|------|------|-----|
| 2                 | F1 ≈ F2           | 1/2  | 1/2  | -    | -   |
|                   | F1 } F2           | 2/3  | 1/3  | -    | -   |
| 3                 | F1 ≈ F2 ≈ F3      | 1/3  | 1/3  | 1/3  | -   |
|                   | F1 } F2 ≈ F3      | 2/4  | 1/4  | 1/4  | -   |
|                   | F1 ≈ F2 } F3      | 2/5  | 2/5  | 1/5  | -   |
|                   | F1 } F2 } F3      | 3/6  | 2/6  | 1/6  | -   |
| 4                 | F1 ≈ F2 ≈ F3 ≈ F4 | 1/4  | 1/4  | 1/4  | 1/4 |
|                   | F1 } F2 ≈ F3 ≈ F4 | 2/5  | 1/5  | 1/5  | 1/5 |
|                   | F1 ≈ F2 } F3 ≈ F4 | 2/6  | 2/6  | 1/6  | 1/6 |
|                   | F1 ≈ F2 ≈ F3 } F4 | 2/7  | 2/7  | 2/7  | 1/7 |
|                   | F1 } F2 } F3 ≈ F4 | 3/7  | 2/7  | 1/7  | 1/7 |
|                   | F1 } F2 ≈ F3 } F4 | 3/8  | 2/8  | 2/8  | 1/8 |
|                   | F1 ≈ F2 } F3 } F4 | 3/9  | 3/9  | 2/9  | 1/9 |
| F1 } F2 } F3 } F4 | 4/10              | 3/10 | 2/10 | 1/10 |     |

Всего вариантов систем предпочтений  $2N-1$  для каждого числа  $N$  сопоставляемых альтернатив.

И наконец, когда по каждому показателю ( $F^*.1... F^*.N$ ) на выбранном подуровне (\*) иерархии  $F$  вида (5) известны лингвистические оценки  $U = (U^*.1 ... U^*.N)$ , а также определена система весов Фишберна  $P = (p^*.1 ... p^*.N)$  на основе системы предпочтений  $P$  вида (4), тогда показатель подуровня  $F^*$  характеризуется своей лингвистической оценкой, определяемой функцией принадлежности на 01-носителе  $x$ :

$$\mu_*(x) = \sum_{i=1}^N \mu_{*i}(x) \times p_i \quad (13)$$

где

$$\mu_{*i}(x) = \begin{cases} (9.1), \text{ если } U_{*i} = \text{"низкий"} \\ (9.2), \text{ если } U_{*i} = \text{"средний"} \\ (9.3), \text{ если } U_{*i} = \text{"высокий"} \end{cases} \quad (14)$$

Соотношение (13) – это OWA-оператор Ягера, причем, поскольку функции принадлежности (14) имеют трапецевидную форму, то и линейная суперпозиция (13) является трапецевидным нечетким числом. Теперь можно свести операции с функциями принадлежности к операциям с их вершинами. Если обозначить трапецевидное число (14) как  $(a_1, a_2)$ , где  $a_i$  соответствуют абсциссам вершин трапеции, то выполняется:

$$\sum_{i=1}^N p_i \times (a_{i1}, a_{i2}) = (\sum_{i=1}^N p_i \times a_{i1}, \sum_{i=1}^N p_i \times a_{i2}) \quad (15)$$

Полученную функцию вида (16) необходимо лингвистически распознать, чтобы выработать суждение о качественном уровне показателя  $F^*$ . Для этого необходимо соотнести полученную функцию  $\mu_*(x)$  и функции  $\mu_{*i}(x)$  вида (9). Если

$$(\forall x \in [0,1]) \sup \min (\mu_*(x), \mu_i(x)) = 0 \quad (16)$$

то уровень показателя F\* однозначно не распознается как уровень, которому отвечает i-я «эталонная» функция принадлежности. Стопроцентное распознавание наступает, если выполняется

$$(\forall x \in [0,1]) \min (\mu_*(x), \mu_i(x)) = \mu_i(x) \quad (17)$$

Во всех промежуточных случаях необходимо задаться мерой распознавания уровня. Такой мерой может быть разновидность нормы Хемминга  $\nu$  [9]. Пусть даны два трапециевидных числа  $(a_1, a_2)$  и  $(b_1, b_2)$  на  $01$ -носителе. Тогда степень схождения  $\nu$  двух таких чисел может быть определена как

$$0 \leq \nu = 1 - \max\{|a_1 - b_1|, |a_2 - b_2|\} \leq 1. \quad (18)$$

Мы провели агрегирование показателей низового уровня иерархии F и распознавание агрегированного фактора по шкале U вида (4). Пройдя последовательно снизу вверх по всем уровням иерархии F и применяя соотношения (13) – (18), мы в итоге получаем функцию принадлежности фактора F0 и лингвистическую интерпретацию уровня этого фактора, сопровождаемую степенью схождения вида (18).

Сам же риск отказа подсистемы «человек» и его лингвистическая оценка напрямую вытекают из предыдущего изложения. Если сопоставить лингвистические переменные «Уровень фактора F0» и «Степень риска отказа подсистемы «человек»», то можно установить взаимно однозначное соответствие вида табл. 4.

Таблица 4 – Соответствие лингвистических переменных

| № терм-множества | Уровень фактора F0 | Степень риска отказа подсистемы «человек» |
|------------------|--------------------|---|
| 1                | H                  | Опасная (высокая)                         |
| 2                | C                  | Пограничная (средняя)                     |
| 3                | B                  | Приемлемая (низкая)                       |

На основе предложенного метода может быть разработана в дальнейшем, имитационная компьютерная модель оценки риска отказа подсистемы «Человек».

### Выводы

Разработаны модель и метод оценки риска отказа подсистемы «Человек» человеко-машинной системы, на основании которых может быть создана в дальнейшем, имитационная компьютерная модель оценки риска отказа подсистемы «Человек».

### Список литературы:

1. **Гражданкин, А. И.** Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов / **А. И. Гражданкин, П. Г. Белов** // *Безопасность труда в промышленности*. – 2000. – № 11. – С. 6-10.
2. **Хенли, Э.** Надежность систем и оценка риска / **Э. Дж. Хенли, Х. Кумamoto** – Машиностроение. – 1984. – 528 с.
3. **Бойко, В. І.** Моделювання надійності функціонування людино-машинних систем в умовах сучасної техносфери / **В. І. Бойко, С. К. Мещанінов** // *Дніпродзержинськ. – «ДДТУ»*. – 2014. – 154 с.
4. *Prikladnie nechetkie sistemy: per. s yap. K. Asayi, D. Watada, S. Ivai / pod red. T. Terano, K. Asayi, M. Sugeno.* – Moskow: Mir. – 1993. – 368 p.
5. **Фукунага, К.** Введение в статистическую теорию распознавания образов: пер. с англ. Гл. ред физико-математической литературы. – М: Мир. – 1979. – 368 с.
6. **Фомин, Я. А.** Распознавание образов: теория и применения. – М.: ФАЗИС. – 2012. – 429 с.
7. **Фишберн, П.** Теория полезности для принятия решений. – М.: Наука. – 1978. – 242 с.
8. **Лотов, А. В.** Многокритериальные задачи принятия решений: учебное пособие / **А. В. Лотов, И. И. Пospelova** // М: МАКС Пресс. – 2008. – 197 с.
9. **Машунин, Ю. К.** Теория управления. Математический аппарат управления в экономике : [учеб. пособие] / **Ю. К. Машунин**. – М.: Логос. – 2013. – (Новая университетская библиотека).
10. **Kaufmann, A., Gupta, M.** Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. – Van Nostrand Reinhold. – 1991. – 330 p.
11. **Рыжов, А. П.** Элементы теории нечетких множеств и измерения нечеткости. – М.: Диалог-МГУ. – 1998. – 242 с.

### Bibliography (transliterated)

1. **Grazdankin, A. I., Belov, P. G.** Expertnaya sistema otsenki tehnogennoho riska opasniy proizvodstvenniy obojctov [Expert system of technical risk assessment of hazardous production facilities]. *Bezopasnost truda v promishlennosti [Safety in industry]*, 2000, **11**, 6-10.
2. **Henli E. Dh., Kumamoto, H.** Nadezhnost system i otsenka riska [Reliability of systems and risk assessment], *Mashinostroenie*, 1984, 528 p.
3. **Boyko, V. I., Meshaninov, S. K.** Modeluvannya nadiynosti funktsionuvannya ludino-mashinnih system v umovah suchasnoyi technosfery [Modelling reliability of man-machine systems in modern technosphere], *Dniprodzerzhinsk «DDTU»*, 2014, 154 p.
4. *Prikladnie nechetkie sistemy: per. s yap. K. Asayi, D. Watada, S. Ivai /pod red. T. Terano, K. Asayi, M. Sugeno.* – M.: Mir, 1993. – 368 p. (russian)
5. **Fukunaga, K.** Vvedenie v statisticheskuyu teoriyu raspoznavaniya obrazov [Introduction to statistical pattern recognition theory]: per. s angl. Gl. red. fiziko-matematicheskoy literaturi, Moskow: Mir, 1979, 368 p.
6. **Fomin, Y. A.** Pattern recognition: theory and application, Moskow: FAZIS, 2012, 429 p.
7. **Fishbern, P.** Teoriya poleznosti dlia priniatiya resheniy [Utility theory for decision making], Moskow: Nauka, 1978, 242 p.
8. **Lotov, A. V., Pospelova, I. I.** Multi-criteria decision-making tasks: textbook. Moskow: MAKS Press, 2008, 197 p.
9. **Machonin, J. K.** Theory of management. The mathematical

- apparatus of management : [учеб. guide]. Moscow: Logos, 2013.
10. **Kaufmann, A., Gupta, M.** Introduction to Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold, 1991, 330 p.
11. **Rizhov, A. P.** Elementy teorii nechetkih mnozestv i izmereniya nechetkosti [Elements of the theory of fuzzy sets and measure the fuzziness]. Moscow: Dialog-MGU, 1998, 242 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Мещанинов Сергей Карминович** – доктор технических наук, профессор, Днепродзержинский государственный технический университет, заведующий кафедры электроники; г. Каменское (Днепродзержинск), Украина; e-mail: sergey.meshaninov@mail.ru

**Meshaninov S. K.** – Doktor of Sciences in Technology, Professor, Chief of Department of Electronics at Dniprodzherzhynsk State University of Technology, Kamenskoye (Dneprodzerzhinsk), UKRAINE, sergey.meshaninov@mail.ru

**Льдовская Александра Владимировна** – студентка, Днепродзержинский государственный технический университет, г. Каменское (Днепродзержинск), Украина; e-mail: Alexsa150380@yandex.ua

**L'Dovskaia A. V.** – student, Dniprodzherzhynsk State University of Technology, Kamenskoye (Dneprodzerzhinsk), UKRAINE; e-mail: Alexsa150380@yandex.ua

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Мещанинов, С. К.** Модель оценки риска отказа подсистемы «человек» / **С. К. Мещанинов, А. В. Льдовская** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 66-72. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.10.

*Please cite this article as:*

**Meshaninov, S. K., L'Dovskaia, A. V.** Model assessment of risk of failure subsystem "man". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 66-72, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.10.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Мещанінов, С. К.** Модель оцінки ризику відмови підсистеми «людина» / **С. К. Мещанінов, О. В. Льдовська** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 66-72. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.10.

**АНОТАЦІЯ** Запропонований вибір інформативних параметрів оцінки психофізіологічного стану людини. На основі використання математичного апарату нечіткої логіки розроблена модель ризику відмови підсистеми «людина» людино-машинної системи. На основі цієї моделі може бути розроблена математична модель оцінки ризику відмови людино-машинної системи і, відповідно, в подальшому, імітаційна комп'ютерна модель оцінки ризику відмови підсистеми «Людина». **Ключові слова:** Людино-машинна система, моніторинг, психофізіологічний стан, нечітка логіка, математична модель, человек-оператор.

*Поступила (received) 02.07.2016*



## ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ДИАГНОСТИКО-ЛЕЧЕБНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В МЕДИЦИНЕ

**А. И. ПОВОРОЗНЮК\*, О. А. ПОВОРОЗНЮК**

Кафедра вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА  
\*email: ai.povoroznjuk@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Формализованы этапы диагностико-лечебных мероприятий при разработке компьютерных систем поддержки принятия решений в медицине. Для комплексной оценки этапов диагностико-лечебного процесса с целью минимизации рисков врачебных ошибок выполняется переход из традиционного пространства диагностических признаков в пространство врачебных действий. Анализ диагнозов в пространстве врачебных действий позволил разработать метод иерархической кластеризации диагнозов в пространстве врачебных действий и коррекцию порогов в диагностическом решающем правиле.

**Ключевые слова:** компьютерная система, принятие решения, диагностика, лечение, врачебное действие, врачебная ошибка, диагностический признак, решающее правило.

## INFORMATION SUPPORT DIAGNOSTIC-MEDICAL ACTION IN MEDICINE

**A. POVOROZNYUK\*, O. POVOROZNYUK**

Department of Computer Science and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The Purpose of the work is a development of information technology for diagnostic and treatment activities steps complex estimation for increasing of their efficiency and minimization of the risk of doctor's mistakes. The Formalized stages diagnostic-medical process at development computer decision support system in medicine. The risks of incorrect decision appear at the stage of diagnosis: an error of the first kind  $\alpha$  and an error of the second kind  $\beta$  are defined with the location of the training set objects in the feature space without considering their impact on the stage of selecting the desired medical action. To minimize the risk of incorrect medical measures due to incorrect diagnosis found the relation between the error diagnostics and the consequences of this error in the appointment of medical action. Transition from the traditional space of marks to the medical action space is offered to minimize the risk. The components medical action space are binary variables (0 – absent, 1 – present), and every diagnosable condition is represented with a point in the  $i^{\text{th}}$  vertex of the hypercube. The use of hierarchical clustering with the criterion of minimum aggregate relations (the search for the minimum cut) in the medical action space for the synthesis of the decision tree provides minimum risk of decision-making in integrated assessment of diagnostic and medical action. In the work the correction method of thresholds of uncertainty interval in solving rule is proposed for an integrated risk assessment of medical errors that arise at both stages of diagnostic and treatment process, including at step medical action. Developed information technologies allow to minimize the risk of medical errors, to improve the reliability and validity of the decisions of the decision maker, and can be adapted to the different subject fields of medicine.

**Keywords:** computer system, decision making, diagnosis, treatment, medical action, doctor mistake, diagnostic sign, solving rule.

### Введение

Комплекс диагностико-лечебных мероприятий (ДЛМ) состоит из двух взаимосвязанных этапов: диагностики заболеваний и лечения выявленных патологий, причем после диагностики и назначения лечебных процедур необходим мониторинг текущего состояния пациента с целью оценки эффективности процесса лечения и, при необходимости, его коррекции. Для лечения того или иного заболевания необходимо предоставление определенных врачебных действий (ВД) на организм пациентов (хирургическое вмешательство, фармакологическое, лечебно-терапевтическое воздействие, реабилитационные мероприятия).

На каждом из указанных этапов врач, как лицо, принимающее решение, производит управленческое

решение в условиях дефицита исходных данных и существенной априорной неопределенности, основываясь на своей квалификации, опыте и интуиции. При этом принятие неправильного решения (врачебная ошибка) как на этапе диагностики, так и на этапе лечения может иметь катастрофические последствия для здоровья пациента. Термин «врачебная ошибка» (ВО) определяет неправильную диагностику болезни или неправильные ВД, которые обусловлены добросовестным заблуждением врача, при этом исключаются халатность и недобросовестность при исполнении своих обязанностей. Причиной ошибки диагностики является недостаточный объем диагностических данных (применение устаревшего оборудования или недостаточная квалификация врача, который назначал список обследований), или

их неверная интерпретация (особенно при субъективном анализе качественных показателей). Причиной неправильных ВД при правильном диагнозе является недостаточный учет индивидуальных особенностей пациента (аллергические реакции на определенные препараты, список болезней, которыми уже болел пациент, какие лекарства принимал и т.д.).

В настоящее время имеется широкий спектр компьютерных диагностических систем в различных предметных областях медицины [1], в которых используются разнообразные математические методы поддержки принятия решения (детерминированная логика [2], вероятностный подход [3], нечеткая логика [4], нейронные сети [5] и т.д.) и современные информационные технологии, включая телемедицину [6–8]. Так как значительная часть диагностической информации содержат биомедицинские сигналы и изображения, то методам их обработки с целью определения диагностических признаков уделяется большое внимание [9–10]. Информатизация ВД ограничивается медицинскими справочниками, в том числе в виде информационно-поисковых систем [11]. В современных компьютерных системах поддержки принятия решений в медицине задачи диагностики и ВД рассматриваются независимо друг от друга, при диагностике минимизируется риск неправильной постановки диагноза без учета этапа лечебных мероприятий, поэтому актуальной является задача минимизации риска ВО при комплексной оценке всех этапов ДЛМ.

### Цель работы

Разработка информационных технологий комплексной оценки этапов ДЛМ с целью повышения их эффективности и минимизации риска врачебных ошибок. Для достижения поставленной цели выполняется переход из традиционного пространства признаков в пространство ВД, который позволил решить следующие задачи :

- минимизировать риски неправильного принятия решения на этапе диагностики с учетом их последствий на этапе ВД при синтезе дерева решения;
- разработать метод коррекции границ интервала неопределенности в диагностическом решающем правиле.

### Формализация и информационные технологии реализации этапов ДЛМ

В формализованном виде задачей диагностики является классификация состояния  $i$ -го пациента  $D_i$  при анализе вектора диагностических признаков  $X_i$

ВД представляются моделью  $M_a = \langle T_p, F, SI \rangle$ , где  $M_a$  – множество ВД;  $T_p = \{t_{pi}\}$  – множество терапевтических действия (ТД),  $F = \{f_i\}$  – множество фармакологических действия (ФД),  $SI = \{si_i\}$  – множество видов хирургического вмешательства.

Назначение ВД при известном  $D_i$  состоит из определения их типа ( $T_p, F, SI$ , или их комбинаций) и перечень конкретных действий. Выбор типа ВД является задачей многокритериального выбора альтернатив, для решения которой используется метод анализа иерархий (МАИ) [12]. Для каждого из допустимых для данного диагноза  $D_i$  типа ВД формируется подмножество необходимых ВД, после чего определяется их реализация с учетом индивидуальных особенностей пациента, противопоказаний к отдельным ВД и многокритериального выбора аналогов.

В [13] формализованы следующие этапы преобразования информации в компьютерных системах поддержки принятия решений в медицине :  $F1: x(t) \rightarrow X$ ,  $F2: x(j,k) \rightarrow X$  – структурная идентификация биосигналов и медицинских изображений соответственно;  $F3: D \rightarrow S_D$  – синтез иерархической структуры диагностируемых состояний (дерево решений);  $F4: X \rightarrow S_z$  – синтез структуры диагностических признаков;  $F5: X_i \rightarrow D_i$  – синтез диагностических решающих правил (РП) при взаимодействии  $S_D$  и  $S_z$ .

Аналогичным образом запишем этапы преобразования информации на этапе ВД:  $F6: D_i \rightarrow ma_{D_i}$  – определение подмножества необходимых ВД при известном  $D_i$ ;  $F7: ma_{D_i} \rightarrow Y_i$  – реализация ВД.

Для комплексной оценки этапов ДЛМ и минимизации рисков ВО рассмотрим более подробно преобразования  $F3$  и  $F5$ . Преобразование  $F3$  выполняется процедурой иерархической кластеризации множества диагностируемых состояний  $\{D_i\}_n$  по критерию минимума ошибки кластеризации в пространстве признаков  $X$ . Результатом преобразования является бинарное дерево решений  $S_D$ , корнем которого является полное множество диагнозов  $\{D_i\}_n$  в заданной предметной области, в ветвях располагаются кластеры диагнозов, а листьями являются отдельные диагнозы. В процессе диагностики  $i$ -го пациента при известном векторе  $X_i$  происходит движение по дереву решений, в каждой  $k$ -й вершине которого выполняется дифференциальная диагностика состояний  $D_q$  и  $D_l$ , путем вычисления РП и принятие решения в пользу  $D_q$  или  $D_l$ . Риски неправильного принятия решения на этапе диагностики:  $\alpha$  – ошибка первого рода и  $\beta$  – ошибка второго рода, определяются расположением эллипсоидов рассеивания объектов обучающей выборки в признаковом пространстве  $X_i$  без учета их влияния на этап выбора необходимых ВД и их последующей реализации.

Для минимизации риска неправильных медицинских мероприятий, которые возникают при ошибочной диагностике, ищется зависимость между ошибкой при диагностике ( $D_q$  вместо  $D_l$ ), и их последствиями при реализации ВД ( $Y_q$  вместо  $Y_l$ ). Так

как реализация ВД должна обеспечить множество необходимых ВД  $Y_q \rightarrow ma_{D_q}$ , а  $Y_l \rightarrow ma_{D_l}$ , то риск в конечном итоге определяется различием компонент множеств  $ma_{D_q}$  и  $ma_{D_l}$ , и для его минимизации в работе предлагается переход от традиционного признакового пространства  $X$  в пространство ВД  $M_a$ . В простейшем случае компоненты  $ma_i \in M_a$  представляются бинарными переменными (0 – отсутствует, 1 – присутствует), тогда каждое диагностируемое состояние  $D_i$  в пространстве ВД представляется точкой в  $i$ -й вершине гиперкуба.

Поэтому в данном случае для выполнения кластеризации диагностируемых состояний в пространстве  $M_a$  удобно представить структуру  $D_i$  потоковой моделью [14], в которой каждый  $D_i$  представляется вершиной полносвязного графа, а каждой дуге графа приписываются определенные числовые значения, которые характеризуют степень близости между двумя вершинами.

Так как ВД являются дихотомическими величинами, то в качестве меры близости выбрано взвешенное расстояние Хэмминга :

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^g w_{ij} |ma_{ki} - ma_{kj}|, \quad (1)$$

где  $ma_{ki}, ma_{kj} \in [0,1]$  –  $k$ -е ВД  $i$ -го и  $j$ -го диагнозов соответственно;  $g$  – размерность пространства  $M_a$ ;  $w_{ij}$  – коэффициент, который обеспечивает увеличения расстояния, в случае присутствия конфликтующих ВД.

Применение иерархической кластеризации по критерию минимума суммарной связи (поиск минимального разреза) в пространстве  $M_a$  для синтеза дерева решений  $S_D$  обеспечивает минимум риска принятия решений при комплексной оценке ДЛМ.

Для реализации вероятностного РП (преобразование  $F5$ ) в работе реализуется метод синтеза уточняющего диагноза [1], который является модификацией метода последовательного анализа (метода Вальда) и основан на анализе взаимодействия иерархических структур диагностических признаков  $S_z$  и диагностируемых состояний  $S_D$ . На каждом  $i$ -м этапе РП, при дифференциальной диагностике между двумя состояниями  $D_q$  и  $D_l$ , анализируется очередной признак  $x_i$  и вычисляется отношение правдоподобия

$$\Theta = \prod_i \frac{P(x_{ik} / D_q)}{P(x_{ik} / D_l)}, \quad (2)$$

которое сравнивается с порогами  $\Theta > A$ ,  $\Theta < B$ , где  $A$  и  $B$  – верхняя и нижняя границы неопределенности, необходимые для принятия решения.

При выполнении одного из условий принимается решение о диагнозе  $D_q$  или  $D_l$  соответственно и выполняется переход на более низкий уровень иерархии диагнозов с целью уточнения диагноза. При невыполнении обеих

неравенств добавляется следующий  $i + 1$  признак и процедура повторяется.

В последовательном анализе границы принятия решений  $A$  и  $B$  связанные с ошибками классификациями  $\alpha$  и  $\beta$  следующими отношениями :

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha}; B = \frac{\beta}{1-\alpha}; \quad (3)$$

Следует отметить, что в (2, 3), условные вероятности и ошибки  $\alpha$  и  $\beta$  определяются в пространстве признаков.

Для комплексной оценки рисков врачебных ошибок, которые возникают на обоих этапах ДЛМ, в работе предлагается метод коррекции границ интервала неопределенности  $[A, B]$ , учитывая ошибки, которые возникают на этапе реализации ВД. Если принять  $\alpha = 0$  и  $\beta = 0$  – детерминированная связь, при которой эллипсоиды рассеяния классов  $l$  и  $q$  не пересекаются, то получаем:  $A = (1-0)/0 = \infty$ ,  $B = 0/(1-0) = 0$ .

Рассмотрим диапазоны изменения  $[A, B]$ . В случае совпадения многомерных функций распределения классов (классы не различимы)  $\alpha = \beta = 0,5$ .  $A = (1-0,5)/0,5 = 1$ ,  $B = 0,5/(1-0,5) = 1$ .

В пространстве ВД ошибки  $\alpha$  и  $\beta$  однозначно определяются минимальным разрезом  $R_i$  в каждом  $i$ -м узле дерева решений, состоящем из  $n_i$  диагностируемых состояний. Значение  $R_i$  определяется как суммарный вес дуг, которые принадлежат минимальному разрезу графа  $D_i$  на подграфа  $D_q$  и  $D_l$  :

$$R_i = \sum_j \sum_k r_{jk}, j \in D_q, k \in D_l. \quad (4)$$

Следует отметить, что  $r_{jk}$  учитывают весовые коэффициенты в (1), и являются асимметричными, то есть  $r_{jk} \neq r_{kj}$ . Нормированное значение  $\bar{R}_i$  выражается формулой:  $\bar{R}_i = R_i / \sum_j \sum_k r_{jk}$ , где  $R_i$  определяется по (4), а в знаменателе суммарный вес всех дуг полносвязного графа из  $n_i$  вершин.

Полученное  $\bar{R}_i$  изменяется в диапазоне  $[0, 1]$  : если  $\bar{R}_i = 0$ , то два состояния  $D_q$  и  $D_l$  в пространстве ВД не различаются (два диагноза не отличаются методами лечения, поэтому даже максимальная ошибка не приводит к врачебной ошибке, то есть  $\alpha = \beta = 0,5$ ). Если  $\bar{R}_i = 1$ , то  $D_q$  и  $D_l$  максимально отличаются один от другого (вершины находятся на главной диагонали гиперкуба), и к ошибкам кластеризации необходимо применять наиболее жесткие требования, то есть  $\alpha = \beta = 0$ .

Исходя из выше изложенного, находится связь между  $\alpha, \beta$  и  $\bar{R}_i$  :

$$\alpha = 0,5(1 - \bar{R}_{q_l}) \quad \beta = 0,5(1 - \bar{R}_{l_q}). \quad (5)$$

Определенные с помощью (5) погрешности задают пороги  $A$  и  $B$ , которые определяются по (3) и используются в РП (2).

### Многокритериальное назначение лекарственных препаратов

Учитывая то, что в качестве ВД для большинства патологий применяется медикаментозное лечение, рассмотрим более подробно реализацию ВД для данного случая, т.е.  $ma_i = f_i$ . В результате преобразования  $F6$  формируется множество необходимых фармакологических действий  $f_{D_i}$ , которые направлены как на ликвидацию причин заболеваний (антивирусные, антибактериальные и прочие), так и на ликвидацию симптомов (жаропонижающие, нормализации давления, сердечного ритма и т.д.).

Преобразование  $F7$  решает задачу формирования комплекса лекарственных препаратов (КЛП) с учетом  $f_{D_i}$  и индивидуальных особенностей  $i$ -го пациента. В формализованном виде указанная задача является задачей формирования множества лекарственных препаратов  $Y_i = \{y_1, \dots, y_{n_i}\}$ , которые обеспечивают процесс выздоровления  $i$ -го пациента (переход из состояния  $D_i$  в состояние  $D_0$  – практически здоровый), при оптимизации интегрального критерия качества процесса реабилитации

$$Q = \min(t, C, \alpha, \beta),$$

где  $t$  – время процесса реабилитации;  $C$  – стоимость процесса реабилитации;  $\alpha, \beta$  – риски отрицательных последствий применения лекарственных препаратов во время процесса лечения и в после-реабилитационный период.

Каждый лекарственный препарат  $y_i$  характеризуется вектором фармакологических действий  $F_{y_i} = \{f_1, \dots, f_{m_i}\}$  и вектором характеристик  $S_{y_i} = \{s_1, \dots, s_r\}$ , каждый компонент которого используется как локальный критерий при многокритериальном сравнении препаратов-аналогов (эффективность, доступность, цена, бренд производителя, риски побочных действий и т.д.). Взаимодействие отдельных препаратов  $y_k$  и  $y_l$  характеризуется показателем  $V_{kl}$  ( $V_{kl} = 0$  – препараты  $y_k$  и  $y_l$  не взаимодействуют;  $V_{kl} > 0$  – препараты  $y_k$  и  $y_l$  усиливают действия друг друга;  $V_{kl} < 0$  – препараты  $y_k$  и  $y_l$  ослабляют действия друг друга, а в предельном случае  $V_{kl} = -1$  – их совместное применение недопустимо). Кроме того, у каждого  $i$ -го пациента может наблюдаться

индивидуальная непереносимость к отдельным препаратам.

При формировании КЛП необходимо сформировать подмножество  $Y_i = \{y_1, \dots, y_{n_i}\}$ , при выполнении условия  $\forall k, l V_{kl} \geq 0, k, l = \overline{1, N}$ , где  $N$  – общее число доступных препаратов, совместное фармакологическое действие которых  $F_{y_1} \cup \dots \cup F_{y_i} \cup \dots \cup F_{y_{n_i}}$  покрывает множество необходимых фармакологических действий для пациента  $F_{D_i}$ . Вариантов такого покрытия может быть много, но надо обеспечить такое покрытие, которое минимизирует критерий качества  $Q$ .

Так как преобразование  $F7$  служат для формирования нескольких решений (вектор  $Y_i$ ), то для их реализации используется модифицированная дискретная искусственная нейронная сеть (ИНС) адаптивной резонансной теории – ART-1 [15], у которой к базовой архитектуре ART-1 добавленный слой регистрирующих нейронов с целью получения нескольких решений.

Разработаны алгоритмы обучения и формирования множества решений ИНС в  $F1$  и  $F4$ , а также алгоритм настраивания весов связей регистрирующего слоя, которые соответствуют глобальным приоритетам  $q_k$  препаратов-аналогов  $y_k$ , полученным на основе обработки экспертных оценок (парных сравнений относительно системы локальных приоритетов) препаратов-аналогов по МАИ [15].

### Программная реализация

В качестве основной платформы обоснован выбор Java [16], в которой обеспечивается возможность развертывания системы в различных аппаратно-программных средах, непроприетарный характер платформы, наличие множества открытых библиотек, поддерживаемых сообществом разработчиков. Проектирование архитектуры выполнялось с использованием шаблонов проектирования [17]. В архитектуре системы выделены три основных модуля: модуль взаимодействия с пользователем, базу данных (БД), включающую в себя базу знаний (БЗ) и модуль построения знаний.

Модуль взаимодействия с пользователем представлен графическим интерфейсом пользователя и позволяет осуществлять сбор данных обследований, административных данных, а также данных предоставляемых экспертами, которые используются при формировании знаний системы.

При этом определены следующие типы пользователей: администратор, врач-эксперт и врач-пользователь. Администратор определяет, какими полномочиями наделить другим пользователей, однако не имеет возможности самостоятельно вносить изменения в БД и БЗ, а также проводить

верификацию решения системы, поскольку не является врачом.

Наибольшими полномочиями владеет врач-эксперт. Он имеет возможность не только пересматривать, но и корректировать БД (удалять, изменять данные), вносить изменения в БЗ, а также корректировать решение системы. Однако, основная задача эксперта – это формирования БЗ. Пользователь-врач имеет возможность лишь пересматривать БД и, введя индивидуальные данные пациента, получить решение системы относительно диагноза и списка рекомендованных препаратов. Кроме того, ему предоставляется возможность вносить изменения в полученное решение, выполнив его верификацию. В зависимости от типа пользователя меняется и интерфейс системы.

Модуль построения знаний отвечает за формирование фреймов знаний, представленных иерархической структурой  $S_D$ , параметрами РП, множествами  $f_{di}$ , описаниями лекарственных препаратов, экспертными оценками относительно локальных и глобальных приоритетов препаратов-аналогов.

Развертывание системы возможно на одном или на различных серверах с кластеризацией наиболее нагруженных модулей, а также конфигурирование балансировщика нагрузки (loadbalancer).

Работоспособность и эффективность работы системы подтверждается ее тестированием на реальных медицинских данных. Подсистема диагностики тестировалась с использованием обучающей выборки из 400 пациентов. В качестве предметной области выбрано заболевание крови, задано 4 класса по 100 пациентов в каждом ( $D_0$  – условно здоровые,  $D_1$  – железнодефицитная анемия,  $D_2$  – анемия вследствие недостатка белков,  $D_3$  – анемия вследствие ферментных нарушений). Диагностическими признаками являются 13 показателей клинического анализа крови. Средняя достоверность компьютерного диагноза – 96,5%.

Подсистема назначения лекарственных препаратов тестировалась с использованием обучающей выборки из 194 пациентов. Предметная область медицины – дерматология. Диагностика ведется по 3 основным диагнозам (псориаз, экзема, лекарственная болезнь), при этом 117 пациентов имеют сопутствующие заболевания.

Указанные диагнозы (основные и сопутствующие) соответствуют 41 фармакологическому действию [18]. Для реализации указанных фармакологических действий, в БД лекарственных средств, согласно [11] внесено 340 лекарственных препаратов. Сформирована БЗ экспертных оценок и параметров ИНС. Результаты верификации решений системы относительно КЛП врачом-пользователем приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты верификации решений системы

| Основной диагноз  | N   | N1  | Верификация результатов врачом-пользователем |    |               |    |
|-------------------|-----|-----|--|----|---------------|----|
|                   |     |     | подтвердил                                   |    | корректировал |    |
|                   |     |     | ед.  | %  | ед.           | %  |
| Псориаз           | 116 | 68  | 99   | 85 | 17            | 15 |
| Лекарств. болезнь | 45  | 27  | 40   | 89 | 5             | 11 |
| Экзема            | 33  | 22  | 29   | 88 | 4             | 12 |
| Всего             | 194 | 117 | 168  | 87 | 26            | 13 |

\* обозначения в табл. 1 : N – Общее число пациентов, N1 – из них имеют сопутствующие заболевания.

### Обсуждение результатов

Таким образом, в 87% проведенных экспериментов врач согласился с решением системы. Если же врач не согласен с решением системы и выполняет его коррекцию, то в системе предусмотрен режим обучения ИНС с учителем, который разрешает системе “подстраиваться” под мнение врача.

В условиях рассмотренного примера (диагноз – псориаз, пациент принадлежит третьей группе) по дезинтоксикационному терапевтическому действию из всех препаратов-аналогов, которые обладают этим действием, системой был избран реосорбилакт. При этом глобальные приоритеты препаратов-аналогов следующие : неогемодез – 0,199; реосорбилакт – **0,343**; энтеросгель – 0,104; кардонат – 0,188; магния сульфат – 0,183.

Допустим, врач не согласен с таким решением системы, и из предложенных ему препаратов-аналогов выбирает кардонат. Установив значение обучающего коэффициента  $\alpha = 0,1$  по выражению

$$g_j^{new} = (g_j + \alpha q_j) / (1 + \alpha), \quad j = \overline{1, n1},$$

определяются новые значения глобальных приоритетов препаратов, то есть весовых коэффициентов нейронной сети : неогемодез – 0,181; реосорбилакт – **0,312**; энтеросгель – 0,095; кардонат – 0,262; магния сульфат – 0,166.

Если врач снова подтверждает свой выбор, то есть снова выбирает кардонат, то значения весовых коэффициентов нейронной сети будут иметь вид: неогемодез – 0,165; реосорбилакт – 0,284; энтеросгель – 0,086; кардонат – **0,329**; магния сульфат – 0,151.

Таким образом, уже после двух шагов обучения система будет выбирать именно тот препарат, на назначении которого настаивает врач.

В зависимости от значения обучающего коэффициента  $\alpha$  варьируется “скорость” обучение системы. Например, при  $\alpha = 0,02$  в условиях рассмотренного примера обучения пройдет за семь шагов (при условии, что врач подтверждает свой

выбор). Таким образом, значение обучающего коэффициента определяет степень доверия к данному врачу-пользователю, который проводит верификацию решения системы. В предельном случае, когда  $\alpha=0$ , система вообще не будет ориентироваться на мнение врача.

### Выводы

Разработаны информационные технологии поддержки принятия решений при проведении ЛДМ на основе формализации этапов проведения ЛДМ при их комплексной оценке, что позволяет минимизировать риски врачебных ошибок, повысить достоверность и обоснованность решений.

Для комплексной оценки этапов диагностико-лечебного процесса с целью минимизации рисков врачебных ошибок выполняется переход из традиционного пространства диагностических признаков в пространство врачебных действий.

Анализ диагнозов в пространстве врачебных действий позволил решить следующие задачи : минимизировать риски неправильного принятия решения на этапе диагностики с учетом их последствий на этапе ВД при синтезе дерева решения; разработать метод коррекции границ интервала неопределенности в диагностическом решающем правиле.

Выполнена программная реализация и ее тестирование на реальных медицинских базах данных. Архитектура программного обеспечения системы позволяет легко адаптироваться к различным предметным областям медицины.

Дальнейшие исследования направлены на использование более сложного представления врачебных действий, включая при необходимости ранговые и числовые компоненты, формируя соответствующее пространство при реализации других видов врачебных действий (хирургическое вмешательство, лечебно-терапевтическое воздействие, реабилитационные мероприятия).

### Список литературы

1. **Поворознюк, А. И.** Системы поддержки принятия решений в медицинской диагностике. Синтез структурированных моделей и решающих правил / **А. И. Поворознюк** – Saarbrücken Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – 2011. – 314 с.
2. **Кобринський, Б. А.** Ретроспективний аналіз медичних експертних систем / **Б. А. Кобринський** // *Новини штучного інтелекту*. – 2005. – № 2. – С. 6-18.
3. **Sadegh-Zadeh, K.** The Logic of Diagnosis / **K. Sadegh-Zadeh** // *Philosophy of Medicine* – 2011. – P. 357-424.
4. **Innocent, P. R.** Fuzzy Methods and Medical Diagnosis / **P. R. Innocent, R. I. John, J. M. Garibaldi** // *The Centre for Computational Intelligence Department of Computer Science De Montfort University, Leicester, UK*. – 2004. – P. 4-17.
5. **Ceylana, R.** A novel approach for classification of ECG arrhythmias: Type-2 fuzzy clustering neural network / **R.**

6. **Ceylana, Y. Özbaya, B. Karlikb** // *Expert Systems with Applications*. – 2009. – Vol. 36 (3). – P. 6721-6726. – doi: 10.1016/j.eswa.2008.08.028.
7. **Yang, Y. T.** Trends in the growth of literature of telemedicine: A bibliometric analysis / **Y. T. Yang, U. Iqbal, Horn-Yu Ching J.** [et al.] // *Computer Methods and Programs in Biomedicine* – Vol. 122 (3) – 2015. – P. 471-479. – doi: 10.1016/j.cmpb.2015.09.008.
8. **Владимирский, А. В.** Телемедицина: монография / **А. В. Владимирский**. – Донецк: ООО «Цифровая типография». – 2011. – 437 с.
9. **Hwang D.** Monitoring Progress and Adherence with Positive Airway Pressure Therapy for Obstructive Sleep Apnea: The Roles of Telemedicine and Mobile Health Applications / **D. Hwang** // *Sleep Medicine Clinics* – Vol. 11 (2) – 2016. – P. 161–171. – doi: 10.1016/j.jsmc.2016.01.008.
10. **Файнзильберг, Л. С.** Обобщенный метод обработки циклических сигналов сложной формы в многомерном пространстве параметров / **Л. С. Файнзильберг** // *Проблемы управления и информатики*. – 2015. – № 2. – С. 58-71.
11. **Trzuppek, M.** Intelligent image content semantic description for cardiac 3D visualisations / **M. Trzuppek, M. R. Ogiela, R. Tadeusiewicz** // *Engineering Applications of Artificial Intelligence* – Vol. 24 (8) – 2011. – P. 1410-1418. – doi: 10.1016/j.engappai.2011.05.005.
12. Компендиум 2015 – лекарственные препараты /Под ред. **В.Н. Коваленко, А.П. Викторова**. [Электронный ресурс] <http://www.compendium.com.ua>.
13. **Саати Томас Л.** Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Научн. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова – М.: Издательство ЛКИ. – 2008. – 360 с.
14. **Povoroznyuk, A. I.** Design of decision support system when undertaking medical-diagnostic action / **A. I. Povoroznyuk, A. E. Filatova, W. Surtelb, and others** // *Optical Fibers and Their Applications*. – 2015. – Proc. of SPIE Vol. 9816. – P. 9816101–98161017. – doi: 10.1117/12.2229295.
15. **Филлиппс, Д.** Методы анализа сетей. Пер. с англ. / **Д. Филлиппс, А. Гарсиа-Диас** – М.: Мир. – 1984. – 648 с.
16. **Дмитриенко В. Д.** Многокритериальная оценка лекарственных препаратов / **В. Д. Дмитриенко, О. А. Поворознюк** // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – Вінниця, ВНТУ. – 2009 – №3. – С.144-148.
17. **Эккель, Б.** Философия Java / **Б. Эккель** – СПб.: Питер. – 2009. – 640 с.
18. **Бек, К.** Шаблоны реализации корпоративных приложений / **К. Бек** – М.: ООО "И.Д. Вильямс". – 2008. – 176 с.
19. Рациональна діагностика та лікування в дерматології та венерології / За ред. **І. І. Маврова** // "Довідник лікаря Дерматолог – Венеролог". – К.: ТОВ "Доктор-Медіа". – 2007. – 344 с.

### Bibliography (transliterated)

1. **Povoroznyuk, A. I.** Sistemy podderzhki prinjatija reshenij v medicinskoj diagnostike. Sintez strukturirovannyh modelej i reshajushih pravil. Saarbrücken Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011, 314 p.
2. **Kobrin'skij, B. A.** Retrospektivnij analiz medichnih ekspertnih system. *Novini shtuchnogo intelektu*, 2005, 2, 6-18.

3. **Sadegh-Zadeh, K.** The Logic of Diagnosis. *Philosophy of Medicine*, 2011, 357-424.
4. **Innocent, P. R. John, R. I., Garibaldi, J. M.** Fuzzy Methods and Medical Diagnosis. *The Centre for Computational Intelligence Department of Computer Science De Montfort University, Leicester, UK*. 2004, 4-17.
5. **Ceylana, R., Özbaya, Y., Karlikb, B.** A novel approach for classification of ECG arrhythmias: Type-2 fuzzy clustering neural network. *Expert Systems with Applications*, 2009, **36**(3), 6721-6726, doi: 10.1016/j.eswa.2008.08.028.
6. **Yang, Y. T., Iqbal, U., Horn-Yu Ching J.** [et al.] Trends in the growth of literature of telemedicine: A bibliometric analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2015, **122**(3), 471-479, doi: 10.1016/j.cmpb.2015.09.008.
7. **Vladimirskij A. V.** Telemedicina: monografija. Doneck: ООО «Cifrovaja tipografija», 2011, 437 p.
8. **Hwang, D.** Monitoring Progress and Adherence with Positive Airway Pressure Therapy for Obstructive Sleep Apnea: The Roles of Telemedicine and Mobile Health Applications. *Sleep Medicine Clinics*, 2016, **11** (2), 161-171, doi: 10.1016/j.jsmc.2016.01.008.
9. **Fajnzil'berg L. S.** Obobshchennyj metod obrabotki ciklicheskih signalov slozhnoj formy v mnogomernom prostranstve parametrov. *Problemy upravlenija i informatiki*. 2015, **2**, 58-71.
10. **Trzuppek, M., Ogiela, M. R., Tadeusiewicz, R.** Intelligent image content semantic description for cardiac 3D visualisations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, **24** (8), 1410-1418, doi: 10.1016/j.engappai.2011.05.005.
11. Kompendium 2015 – lekarstvennye preparaty. Pod red. **V. N. Kovalenko, A. P. Viktorova.** [Web] <http://www.compendium.com.ua>.
12. **Saati Tomas L.** Prinjatje reshenij pri zavisimostjakh v obratnyh svjazjakh: Analiticheskie seti. Per. s angl. / Nauchn. red. A. V. Andrejchikov, O .N. Andrejchikova. Moskow: Izdatel'stvo LKI, 2008, 360 p.
13. **Povoroznyuk, A. I., Filatova, A. E., Surtelb, W.** Design of decision support system when undertaking medical-diagnostic action. *Optical Fibers and Their Applications*, 2015, **9816**, 98161O1-98161O17, doi: 10.1117/12.2229295.
14. **Fillips, D., Garsia-Dias, A.** Metody analiza setej. Per. s angl. Moskow: Mir, 1984, 648 p.
15. **Dmitrienko, V. D., Povoroznyuk, O. A.** Mnogokriterial'naya ocenka lekarstvennikh preparatov. *Informacijni tekhnologii ta kompjuterna inzheneriya*. Vinnica, VNTU, 2009, **3**, 144-148.
16. **Jekkel', B.** Filosofija Java. SanktPiterburg: Piter, 2009, 640p.
17. **Bek, K.** Shablony realizacii korporativnyh prilozhenij. Moskow: ООО "I.D. Vil'jams", 2008, 176 p.
18. Racional'na diagnostika ta likuvannja v dermatologii i venerologii. Za red. **I. I. Mavrova.** "Dovidnik likarja Dermatolog – Venerolog". Kyiv: TOV "Doktor-Media", 2007, 344 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Поворозюк Анатолий Иванович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры вычислительной техники и программирования; г. Харьков, Украина; e-mail: ai.povoroznjuk@gmail.com.

**Anatoly Povoroznyuk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Engineering and Programming National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkov, Ukraine, E-mail: ai.povoroznjuk@gmail.com

**Поворозюк Оксана Анатольевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры вычислительной техники и программирования; г. Харьков, Украина; e-mail: povoks@i.ua.

**Oksana Povoroznyuk** – Candidate of Technical Sciences, Department of Computer Engineering and Programming National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkov, Ukraine, E-mail: povoks@i.ua.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Поворозюк, А. И.** Информационная поддержка диагностико-лечебных мероприятий в медицине / **А. И. Поворозюк, О. А. Поворозюк** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 73-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.11.

Please cite this article as:

**Povoroznyuk, A., Povoroznyuk, O.** Information support diagnostic-medical action in medicine. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 73-79, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.11.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Поворозюк, А. І.** Інформаційна підтримка діагностично-лікувальних заходів в медицині / **А. І. Поворозюк, О. А. Поворозюк** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №25(1197). – С. 73-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.11.

**АНОТАЦІЯ** Формалізовані етапи діагностично-лікувальних заходів при розробці комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень в медицині. Для комплексної оцінки етапів діагностично-лікувального процесу з метою мінімізації ризиків лікарських помилок виконується перехід з традиційного простору діагностичних ознак в простір лікарських дій. Аналіз діагнозів в просторі лікарських дій дозволив розробити метод ієрархічної кластеризації діагнозів в просторі лікарських дій і корекцію порогів в діагностичному вирішальному правилі.

**Ключові слова:** комп'ютерна система, прийняття рішення, діагностика, лікування, лікарська дія, лікарська помилка, діагностична ознака, вирішальне правило.

Поступила (received) 19.06.2016

## ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СЛУЧАЙНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В ДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ БИОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Е. И. СОКОЛ<sup>1</sup>, В. В. БОЙКО<sup>2</sup>, П. Ф. ЩАПОВ<sup>1</sup>, П. Н. ЗАМЯТИН<sup>2</sup>, Р. С. ТОМАШЕВСКИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ «ХПИ», Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Институт общей и неотложной хирургии им. В.Т. Зайцева, Харьков, УКРАИНА

\*email: tomashevskiy.emb@khpi.edu.ua

**АННОТАЦИЯ** Представлены результаты сравнительного анализа информационных свойств параметров биоэлектрических измерительных сигналов несущих информацию о биохимических особенностях биологических и химических материалов, подвергаемых динамическому факторному воздействию. Доказана возможность идентификации вида биохимического состояния с учетом заданного риска неправильных решений. Получена методика оценки количества ожидаемой информации для комплексных информативных параметров, позволяющая ранжировать последним по степени убывания этой информации.

**Ключевые слова:** биологический объект, факторная нагрузка, информативный параметр, динамический эксперимент, уровень значимости.

## INFORMATION ANALYSIS OF RANDOM MEASURING SIGNALS IN DYNAMIC BIOPHYSICAL EXPERIMENTS

E. SOKOL<sup>1</sup>, V. BOYKO<sup>2</sup>, P. SHCHAPOV<sup>1</sup>, P. ZAMYATIN<sup>2</sup>, R. TOMASHEVSKIY<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Dept. "Industrial and biomedical electronics", National technical university "Kharkiv Politechnical institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> State Institution "V.T. Zaytsev Institute of General and Urgent Surgery of NAMS of Ukraine", Kharkiv, UKRAINE

\*email: tomashevskiy.emb@khpi.edu.ua

**ABSTRACT** The aim of paper: demonstrate the possibility of factor analysis in the task a comparative selection of informative parameters of random measurement signals which characterizes the inertia of the electrostatic interactions in biological objects under dynamic external load. **Applied methods:** To investigate the changes in the electrical properties of biological and chemical liquid materials were selected three groups of samples with verified chemical and biological conditions. Two gold-plated electrodes were used to measure the electrical potential of the liquid sample, immersed in the test liquid. Pressure change performed by moving the piston in the cylindrical chamber, the bottom of which electrodes are fixed by the difference in the magnitude of their active surface area. The procedure of discrete differentiation process has been proposed for the electrochemical detection of differences of inertia of objects. To determine the number of expected data was used Fischer F-statistics. **The results:** All F-statistics exceed a critical value that shows the ability of informative parameters responsive to changes in its average value by changing the state of the test object (dispersion changes due to the change of the biochemical state of the sample, the mean value of 2 - 9 times the residual variance of the random deviations). **Conclusions:** The possibility of obtaining information to identify the biochemical status of objects, using the results of an active factor of the dynamic experiment, even in the face of random parametric uncertainty of the measurement signals. The method of estimating the amount of the expected information for complex informative parameters, allowing the latter to rank in descending order of this information was obtained.

**Keywords:** biological object, factor load, informative parameter, dynamic experiment, significance level.

### Введение

Любые биологические объекты, особенно на клеточном уровне, энергетически используют силы электростатического взаимодействия. Такое взаимодействие характерно как для химических, так и биологических структур, когда основные свойства объекта проявляются только в динамике. Однако изучение динамических электрофизических свойств биологических объектов – задача исключительно сложная, поскольку измерительные сигналы, несущие информацию о подобных свойствах – это случайные процессы с бесконечным набором проявлений нестационарности.

Выявление закономерностей в таких процессах возможно лишь в условиях динамических факторных воздействий когда обеспечена более или менее стационарная модель ответной реакции биологического объекта [1]. Эффективность подобных исследований тем выше, чем больше информативность используемых измерительных сигналов и чем выше уровень статистического обоснования планов измерительных экспериментов.

К сожалению, использование информационно-статистических подходов к формированию планов динамических испытаний биологических объектов не применяется на практике, а теоретические аспекты их использования не идут дальше задач параметрического оценивания возможных рисков.



Общие задачи планирования динамических экспериментов связаны, в первую очередь, с разработкой общих основ информационно-измерительных технологий контроля [2-5] и информационной теории измерений [6-8]. Методы планирования активных экспериментов и использование случайных моделей факторного влияния хорошо разработаны для общетехнических и научных задач [9]. Информационно-измерительные технологии динамического контроля биофизических свойств сложных биохимических объектов [10] – практически не разработаны.

### Цель работы

Цель работы – показать возможности факторного дисперсионного анализа в задаче сравнительного выбора информативных параметров случайных измерительных сигналов, характеризующих инерционность электростатических взаимодействий в биохимических объектах, обусловленных динамическими внешними нагрузками.

### Выбор образцов и факторных нагрузок в динамическом биофизическом эксперименте

Для исследования изменений электрофизических свойств биологических и химических жидких материалов были выбраны три группы образцов с верифицированными химическими и биологическими состояниями:

- состояние  $S_0$  (физраствор);
- состояние  $S_1$  (цельная кровь без патологии);
- состояние  $S_2$  (цельная кровь с онкопатологией – колоректальный рак (КРР)).

Объем жидких образцов – 1 см<sup>3</sup>.

Регулируемая факторная нагрузка  $P(t)$  – циклическое изменение во времени давления на образец (до 1 атм).

Случайные нерегулируемые и неконтролируемые факторы (возмущения):

- нестационарность по математическому ожиданию электрохимического дрейфа в процессах формирования биопотенциалов на электродах первичного измерительного преобразователя (вызывает дополнительную аддитивную погрешность преобразования);

- неоднозначность в обеспечении условий строгой (метрологически обоснованной) повторяемости значений предельного атмосферного давления и параметров его изменений во времени (вызывает появление мультипликативных погрешностей в циклах нагрузочного воздействия).

Для измерения электрических потенциалов жидкого образца использовались два позолоченных электрода, погруженных в исследуемую жидкость. Изменение давления осуществлялось за счет перемещения поршня в цилиндрической камере, на

дне которой находились электроды с фиксированным различием в величине площади их активных поверхностей.

Длительность каждого цикла – от 4-х до 5-ти секунд. Типичные зависимости  $U(t)$  зарегистрированных во времени  $t$  электропотенциалов на электродах первичного измерительного преобразователя для 2-х последовательных циклов изменения атмосферного давления представлена на рис. 1 (сплошная линия – параболический дрейф  $\hat{U}(t)$  нулевого значения выходного сигнала первичного преобразователя)

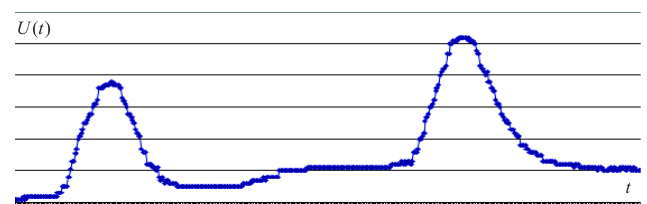


Рис. 1 – Временные зависимости биопотенциала  $U(t)$

### Выделение информативных параметров измерительного сигнала

Динамичность режимов факторной нагрузки на образец определило выбор информативных параметров, связанных с динамикой зарегистрированных электропотенциалов, с учетом различной электрохимической инерции процессов ионной проводимости образцов при возрастании и убывании нагрузки.

Для выявления таких различий была предложена процедура дискретного (цифрового) дифференцирования процессов  $U(t)$  – изменения электропотенциала в рамках одного цикла нагружения.

Для устранения дрейфовой аддитивной погрешности в чувствительности первичного преобразователя была осуществлена процедура центрирования его выходного сигнала [2].

$$\overset{\circ}{U}(t) = U(t) - \hat{U}(t), \quad (1)$$

где  $\hat{U}(t)$  – параболическая регрессия, обусловленная дрейфом нулевого значения выходного сигнала преобразователя.

Для уменьшения мультипликативных погрешностей, вызванных неоднородностью условий факторного нагружения, было предложено пронормировать (для каждого цикла нагружения) по максимальному значению  $U_m$  центрированный процесс  $\tilde{U}(t)$

$$\tilde{U}(t) = \overset{\circ}{U}(t) / U_m. \quad (2)$$

Кроме этого, было предложено сформировать параметры, несущие информацию о виде ( $S_0$ ,  $S_1$  или  $S_2$ ) состояния образца, как параметры комплексные, базирующиеся на отношении показателей, отражающих динамику процесса  $\tilde{U}(t)$ , (отдельно, при

возрастании и убывании нагрузки  $P(t)$ . Для выделения таких показателей, каждый из процессов  $\tilde{U}(t)$  (в пределах своего цикла) был продифференцирован, что позволило использовать для последующего анализа процессы  $V_U(t)$  изменения скорости электропотенциалов во времени:

$$V_U(t) = \frac{d\tilde{U}(t)}{dt} \quad (3)$$

На рис. 2 представлены типичные производные  $V_U(t)$  для двух образцов с состояниями  $S_1$  и  $S_2$ .

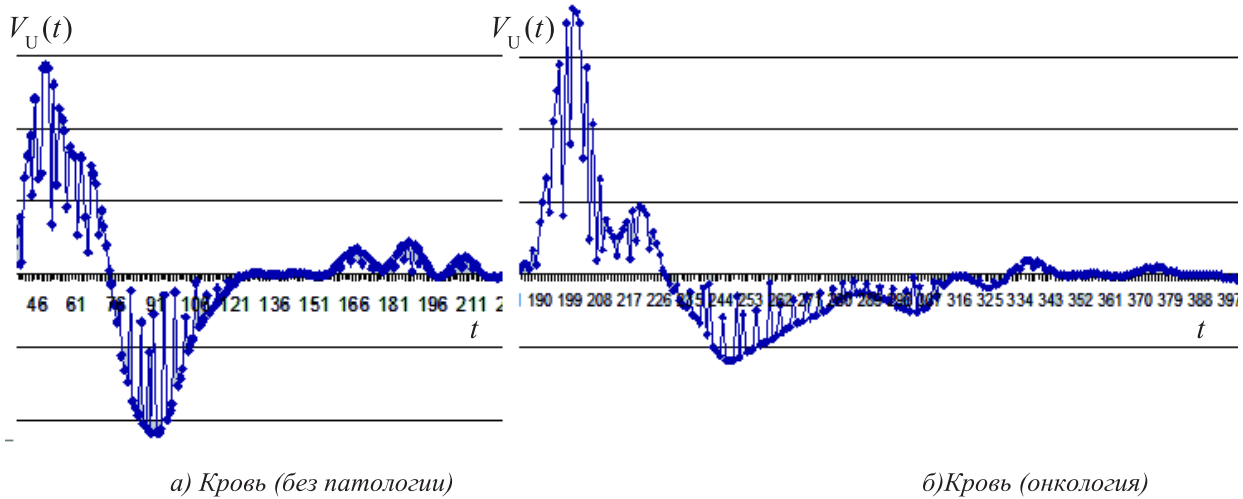


Рис. 2 – Временные зависимости производных биопотенциала

Предварительный анализ полученных процессов  $V_U(t)$  для состояний  $S_0$ ,  $S_1$  и  $S_2$  показал следующее. Независимо от цикла и вида состояния положительный максимум  $V_{max}$  больше (по абсолютному значению), чем отрицательный минимум  $V_{min}$  в процессе  $V(t)$ .

Вторая производная процесса  $\tilde{U}(t)$

$$a(t) = \tilde{U}''(t) = \frac{dV_U(t)}{dt} \quad (4)$$

имеет большее число пересечений  $n_2$  нулевого уровня для отрицательных значений  $V(t)$ , чем число  $n_1$  пересечений для положительных значений  $V(t)$ . Более того, для состояния  $S_0$

$$n_1 = n_2, \quad (5)$$

а для состояний  $S_1$  и  $S_2$

$$n_1 > n_2 \quad (6)$$

Если же сравнить число  $n_2$  для состояния  $S_1$  (обозначим как  $n_1^{(2)}$ ) и для состояния  $S_2$  (обозначим как  $n_2^{(2)}$ ), то

$$n_1^{(2)} > n_2^{(2)}. \quad (7)$$

Все процессы  $U(t)$ , независимо от номера цикла и вида состояния – асимметричны, причем при переходе от состояния  $S_0$  к  $S_1$  и от  $S_1$  к  $S_2$  асимметрия только растет (время затухания процесса  $V_U(t)$ , от  $V_{min}$  до нуля увеличивается при одновременном увеличении числа  $n_2$  пересечений нуля во второй производной  $a(t)$ ).

Результаты предварительного анализа позволяют выделить, как минимум, три информативных параметра, в дальнейшем

обозначаемые, как  $Y_1$ ,  $Y_2$  и  $Y_3$ , определяемые логическим условием:

$$V_U(t) \neq 0 \quad (8)$$

отрицательности или положительности скорости  $V_U(t)$ , при сравнения её геометрических особенностей на разных интервалах временной оси. Последнее позволяет представлять эти параметры как относительные и безразмерные.

В качестве информативного (в отношении биохимического состояния) параметра  $Y_1$ , косвенно связанного с квантовыми эффектами электропотенциальных преобразований, была выбрана функция, зависящая от глобальных и локальных экстремумов  $V_{Umax}$ ,  $V_{Umin}$ ,  $\bar{V}_{Umin}$  скорости  $V_U(t)$  при нагружении ( $V_U(t) > 0$ ) и разгрузке ( $V_U(t) < 0$ ) образца:

$$Y_1 = F(V_{Umax}, V_{Umin}, \bar{V}_{Umax}, \bar{V}_{Umin} / V_U(t) \neq 0) \quad (9)$$

В качестве параметров, несущих информацию о биохимическом состоянии с учетом непосредственно квантовых эффектов, были выбраны параметры  $Y_2$  и  $Y_3$ :

$Y_2$  – функция, зависящая от средневзвешенного отношения числа ступенек процесса  $V_U(t)$  для областей где  $V_U(t) < 0$  и  $V_U(t) > 0$ ;

$$Y_2 = F(n_1, n_2 / V_U(t) \leq 0). \quad (10)$$

$Y_3$  – функция, зависящая от средневзвешенных фазовых сдвигов ступенек  $\bar{\tau}_1$  и  $\bar{\tau}_2$  относительно точки  $V_U(t_0) > 0$ , для областей  $V_U(t) < 0$  и  $V_U(t) > 0$ .

$$Y_3 = F(\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2 / V_U(t) \leq 0). \quad (11)$$

**Дисперсионный анализ результатов динамического эксперимента**

Независимо от вида ( $Y_1$ ,  $Y_2$  или  $Y_3$ ) информативного параметра следует учитывать следующее:

а) любой из параметров  $Y_m$ ,  $m = 1, 2, 3$  является случайной величиной (из-за наличия внешних и внутренних возмущающих случайных факторов).

б) каждому из состояний  $S_0$ ,  $S_1$  или  $S_2$  соответствуют свои наборы числовых характеристик для случайных величин  $Y_m$  (средние значения, дисперсии, коэффициенты асимметрии и эксцесса и т.п.).

в) ограниченность экспериментальных данных (малое число образцов с известными, т.е. верифицированными состояниями позволяет использовать в качестве источника информации только среднее значение анализируемых параметров  $Y_1$ ,  $Y_2$  или  $Y_3$ . Дисперсия и моменты, более высоких порядков требуют больших выборок.

Удобной математической моделью информационного исследования, в этом случае, является однофакторная параметрическая модель, дисперсионного анализа [9] позволяющая:

1. Оценить статистическую значимость изменений среднего значения любого из параметров  $Y_1$ ,  $Y_2$  или  $Y_3$  при переходе из группы образцов с состоянием  $S_j$  к образцам с состоянием  $S_k$ ,  $j \neq k$ . причем такая оценка учитывает дисперсию результатов измерения значений исследуемого параметра.

2. Оценить количество информации для любого из параметров  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  по тестовой F-статистике [3, 5].

$$I = 0.5 \ln(1 + F) \text{ (бит)}. \quad (12)$$

Влияющим фактором, в рамках дисперсионного анализа, является вид состояния:  $S_0$ ,  $S_1$  или  $S_2$ . Качество анализа гарантируется заданным риском первого рода (уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ ).

Для анализа были использованы результаты испытаний исследуемых групп образцов ( $K = 3$ ):

– физраствор (состояние  $S_0$  – 8 образцов);

– кровь (состояние  $S_1$  – 5 образцов);

– кровь (состояние  $S_2$  – 5 образцов).

Общее число образцов во всех исследуемых группах составило  $N = 18$ , а число образцов по группам – соответственно,  $N_1 = 8$ ;  $N_2 = N_3 = 5$ .

Независимо от вида ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ ) информативного параметра, результат его измерения в эксперименте представим как  $y_{ji}$ , где  $j = 1..K$ ;  $i = 1..N_j$ . Статистическая модель такого результата будет иметь вид [9]:

$$y_{ji} = \bar{Y} + \rho_j + z_{ji} \quad (13)$$

где  $\bar{Y}$  – общее среднее значение всех  $N$  результатов;  $\rho_j$  – отклонение, обусловленное влиянием основного фактора (атмосферное давление);  $z_{ji}$  – случайное остаточное отклонение модели (13), обусловленное влиянием неконтролируемых и нерегулируемых возмущающих факторов.

Если обозначить через  $\bar{Y}_j$  – среднее для результатов в  $j$ - той группе измерений, то уравнения дисперсионного разложения примет вид:

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} (y_{ji} - \bar{Y})^2 = \sum_{j=1}^K N_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 + \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} (y_{ji} - \bar{Y}_j)^2. \quad (14)$$

Критериальная F-статистика, как случайная величина, имеющая F-распределение Фишера – Снедекора [9] с двумя степенями свободы  $V_1 = K-1 = 2$  и  $V_2 = N-K = 15$  запишется в виде отношения:

$$F_{2;15} = \frac{\sum_{j=1}^K N_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_j} (y_{ji} - \bar{Y}_j)^2} \cdot \left( \frac{V_2}{V_1} \right). \quad (15)$$

В таблице 1 представлены:

– результаты вычисления по формулам (9), (10), (11) значений информативных параметров по группам образцов с состояниями  $S_0$ ,  $S_1$  и  $S_2$ ;

– значения критериальных F-статистик, вычисленных по формуле (15). Величина критической F-статистики, для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ , равняется

$$F_{кр} = F_{2;15;\alpha} = 3,68,$$

где  $V_1 = 2$ , а  $V_2 = 15$ .

Таблица 1 – Значения информативных параметров по видам состояний и величины их F-статистик

| Информативный параметр | Состояние образца | Значения информативных параметров для одиночных образцов |       |       |       |       |       |       |       | F-статистика, $F_{2;15}$ |
|------------------------|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
|                        |                   | $S_0$  | $S_1$ | $S_2$ | $S_0$ | $S_1$ | $S_2$ | $S_0$ | $S_1$ |                          |
| $Y_1$                  | $S_0$             | 1,095  | 1,364 | 1,333 | 1,652 | 1,227 | 1,111 | 1,318 | 1,292 | 6,32                     |
|                        | $S_1$             | 1,0  | 1,0   | 1,34  | 1,41  | 1,0   | –     | –     | –     |                          |
|                        | $S_2$             | 2,433  | 2,673 | 2,659 | 1,238 | 1,152 |       |       |       |                          |
| $Y_2$                  | $S_0$             | 1,667  | 2,0   | 4,25  | 2,0   | 1,667 | 1,1   | 1,444 | 1,444 | 12,31                    |
|                        | $S_1$             | 2,182  | 2,0   | 4,333 | 3,19  | 2,125 | –     | –     | –     |                          |
|                        | $S_2$             | 4,01   | 9,8   | 4,75  | 8,8   | 4,72  |       |       |       |                          |
| $Y_3$                  | $S_0$             | 1  | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 32,98                    |
|                        | $S_1$             | 3  | 2     | 3     | 3     | 2     | 1     | 1     | 1     |                          |
|                        | $S_2$             | 6  | 7     | 5     | 4     | 3     | –     | –     | –     |                          |

Из таблицы 1 следует, что максимально информативным является параметр  $Y_3$  (его F-статистика равна 32,98). Следующим по информационной значимости является параметр  $Y_2$  ( $F_{2;15} = 12.31$ ) на последнем месте стоит параметр  $Y_3$  (его F-статистика равна 6.32).

Все F-статистики превышают критическое значение  $F_{кр} = 3.68$  что указывает на способность информативных параметров  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  реагировать на изменение своего среднего значения при смене состояния объекта испытаний (дисперсия изменения, из-за смены биохимического состояния образца, среднего значения  $\bar{Y}_j$  в 2-9 раз больше остаточной дисперсии случайных отклонений  $z_{ji}$ ). В табл. 2 представлены вычисленные по формуле (12) значения количества информации (в нит) для каждого из исследованных параметров.

Таблица 2 – Количества ожидаемой информации (в натуральных единицах информации) по видам информативных параметров

| Информативный параметр | Количество информации (нит) |
|------------------------|-----------------------------|
| $Y_1$                  | 0,995                       |
| $Y_2$                  | 1,294                       |
| $Y_3$                  | 1,763                       |

### Обсуждение результатов

Для оценки информационной независимости параметров  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  были рассчитаны элементы их взаимных, по полному множеству параметров, корреляционных матриц. Для расчета использовались первые пять столбцов «значения информативных параметров для одиночных образцов» табл. 1 ( $N_1 = N_2 = N_3 = n = 5$ ) и два состояния  $S_1$  и  $S_2$ . Полученные матрицы для наборов состояний  $\{S_1, S_1\}$  и  $\{S_2, S_2\}$  имеют следующий вид:

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0,529 & 0,709 \\ 0,529 & 1 & 0,511 \\ 0,709 & 0,511 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0,187 & -0,023 \\ 0,187 & 1 & 0,124 \\ -0,023 & 0,124 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если рассматривать в качестве основной гипотезы (о независимости  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$ )

$$H_0: R_{11} = 0; R_{22} = 0,$$

то критериальная F-статистика для любого из элементов матриц  $R_{11}$  или  $R_{22}$  с корреляцией  $R$  имеет вид

$$F_{1;(n-2)} = \frac{R^2}{(1-R^2)} \cdot (n-2). \quad (16)$$

Поскольку при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  критическая статистика для проверки справедливости гипотезы  $H_0$  равна

$$F_{кр} = F_{1;3} = 10,13, \quad (17)$$

то условием справедливости гипотезы  $H_0$  является

$$F_{1;(n-2)} < F_{кр}, \quad (18)$$

или идентичное, с учетом выражений (16) – (18), условие

$$R = 0,878. \quad (19)$$

Так как все элементы (кроме диагональных) матриц  $R_{11}$  и  $R_{22}$  удовлетворяют условию (19), то гипотеза  $H_0$  – не отвергается, т.е. информативные параметры  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  являются взаимно-независимыми.

Это указывает на возможность формального суммирования информации, полученной по каждому из параметров, объединяя последние в интегральный параметр, например, в рамках линейно-аддитивных моделей функционального преобразования [11]. Даже если и существует корреляция между параметрами  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$ , то эта корреляция меньше единицы, что указывает на возможность получения дополнительной информации по интегральному информативному параметру.

### Выводы

Доказана возможность получения информации для идентификации состояния биохимических объектов, используя результаты активного факторного динамического эксперимента, даже в условиях параметрической неопределенности случайных измерительных сигналов.

Получена методика оценки количества ожидаемой информации для комплексных информативных параметров, позволяющая ранжировать последние по степени убывания этой информации.

Показаны возможности многомерного статистического анализа для повышения информационной эффективности методов оптимального параметрического синтеза систем контроля, диагностики, идентификации биохимических объектов в условиях априорной неопределенности их свойств и состояний.

### Список литературы

- 1 **Бойко, В. В.** Концептуальные аспекты гипербиотических процессов в биологических тканях / **В. В. Бойко, П. М. Замятін, В. И. Жуков** и др. // *Modern problems and prospects of Clinical Medicine, Healthcare and Pharmacy development.* – 2014. – № 43(4). – С. 214-235.
- 2 **Малайчук, В. П.** Інформаційно-вимірювальні технології неруйнівного контролю: [навчальний посібник] / **В. П. Малайчук, О. В. Мозговой, О. М. Петренко.** – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ. – 2001. – 2001 с.
- 3 **Малайчук, В. П.** Обработка многомерных нестационарных случайных пространственно-временных рядов в задачах мониторинга / **В. П.**

- Малайчук, А. В. Мозговой** // *Методи та прилади контролю якості*. – Івано-Франківськ. – 2005. – № 15 – С. 90-93.
- 4 **Володарський, Є. Т.** Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / **Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк** – Вінниця: Велес. – 2001. – 219 с.
- 5 **Бочаров, В. М.** Математические алгоритмы технического диагностирования / **В. М. Бочаров, А. Н. Головаш, В. Г. Шахов** // *Контроль. Диагностика*. – 2007. – №8 (110). – С. 48-51.
- 6 **Орнатский, П. П.** Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа. – 1983. – 455 с.
- 7 **Щапов, П. Ф.** Оптимизация пространства информационных параметров на основе ковариационных моделей дисперсионного анализа / **П. Ф. Щапов** // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №2. – С. 59-62.
- 8 **Назаренко, Л. А.** Статистические методы анализа неопределенности результатов косвенных измерений / **Л. А. Назаренко, П. Ф. Щапов** // *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*. – Х.: Харківський університет повітряних сил. – 2007. – Вип.6(64). – С. 71-73.
- 9 **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / **Н. Джонсон, Ф. Лион**; пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир. – 1981. – 520 с.
- 10 **Зайченко, К. В.** Съём и обработка биоэлектрических сигналов: [учеб. пособие / под ред. К.В. Зайченко.] – С.Пб.: СПбГУАП. – 2001.– 140 с.
- 11 **Щапов, П. Ф.** Повышение достоверности контроля и диагностики объектов в условиях неопределенности: монография / **П. Ф. Щапов, О. Г. Аврунин**. – Харьков: – Х.: ХНАДУ. – 2011. – 191 с.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Boyko, V. V.** Conceptual aspects of giperbiotik processes in biological tissues / **V. V. Boyko, P. M. Zamyatin, V. I. Zhukov** and others // *Modern problems and prospects of Clinical Medicine, Healthcare and Pharmacy development*. 2014, **43**(4), 214-235.
- 2 **Malajchuk, V. P.** Information and measuring technologies of nondestructive testing: [textbook] / **V. P. Malajchuk, O. V. Mozgovej, O. M. Petrenko**. Dnipropetrovsk: RVV DNU, 2001, 2001 p.
- 3 **Malajchuk, V. P., Mozgovej, A. V.** Processing of multidimensional non-stationary random space-time series in the monitoring tasks. *The methods and quality control devices*. Ivano-Frankivsk, 2005, **15**, 90-93.
- 4 **Volodarskij, E. T., Kuharchuk, V. V., Podzharenko, V. O., Serdjuk, G. B.** Measurement software measurement and control: [textbook]. Vinnicja: Veles, 2001, 219 p.
- 5 **Bocharov, V. M., Golovash, A. N., Shahov, V. G.** Mathematical algorithms of technical diagnosing. *Control. Diagnostics*. 2007, **8**(110), 48-51.
- 6 **Ornatskij, P. P.** Theoretical foundations of information and measurement technology. Kyiv: Vishha shkola, 1983, 455 p.
- 7 **Shchapov, P. F.** Optimization of space information parameters based on analysis of variance covariance models. *Electronics and electrical engineering*. 2005, **2**, 59-62.
- 8 **Nazarenko, L. A., Shchapov, P. F.** Statistical methods for the analysis of the uncertainty of indirect measurements. *Information processing systems: scientific research journal*. Kharkiv: Kharkiv universitet povitranjih sil, 2007, **6**(64), 71-73.
- 9 **Jonson, N., Lion, F.** Statistics and experimental design in engineering and science: Methods of experiment planning. Moscow: Mir, 1981, 520 p.
- 10 **Zajchenko, K. V.** Processing of bioelectric signals: [textbook] – SanktPiterburg: SPBGUAP, 2001, 140 p.
- 11 **Shchapov, P. F., Avrunin, O. G.** Increasing the reliability of the control and diagnostic facilities in the face of uncertainty: monograph. Kharkiv: HNADU, 2011, 191 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Сокол Евгений Иванович** – член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Sokol Evgen** – Doctor of science, Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National technical university “Kharkiv Politechnical institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Бойко Валерий Владимирович** – доктор медицинских наук, профессор, Институт общей и неотложной хирургии им. В.Т. Зайцева, г. Харьков, Украина; e-mail: ssvnauka@tns.kharkov.ua .

**Boyko Valeriy** – Doctor of medicine, Professor, State Institution “V.T. Zaytsev Institute of General and Urgent Surgery of NAMS of Ukraine”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: ssvnauka@tns.kharkov.ua.

**Щапов Павел Федорович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина.

**Shchapov Pavel** – Doctor of science, Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National technical university “Kharkiv Politechnical institute”, Kharkiv, Ukraine.

**Замятин Петр Николаевич** – доктор медицинских наук, профессор, Институт общей и неотложной хирургии им. В.Т. Зайцева, г. Харьков, Украина; e-mail: zamyatinp@mail.ru

**Zamyatin Petr** – Doctor of medicine, Professor, State Institution “V.T. Zaytsev Institute of General and Urgent Surgery of NAMS of Ukraine”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: zamyatinp@mail.ru

**Томашевский Роман Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: tomashevskiyi.emb@kpi.edu.ua.

**Tomashevskiy Roman** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department “Industrial and biomedical electronics”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tomashevskiy.emb@khpі.edu.ua.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Сокол, Е. И.** Информационный анализ случайных измерительных сигналов в динамически активных биофизических экспериментах / **Е. И. Сокол, В. В. Бойко, П. Ф. Щапов, П. Н. Замятин, Р. С. Томашевский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 80-86. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.12.

*Please cite this article as:*

**Sokol, E., Boyko, V., Shchapov, P., Zamyatin, P., Tomashevskiy, R.** Information analysis of random measuring signals in dynamic biophysical experiments. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25**(1197), 80-86, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.12.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Сокол, Є. І.** Інформаційний аналіз випадкових вимірювальних сигналів в динамічно активних біофізичних експериментах / **Є. І. Сокол, В. В. Бойко, П. Ф. Щапов, П. Н. Замятін, Р. С. Томашевський** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 80-86. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.12.

**АНОТАЦІЯ** Наведені результати порівняльного аналізу інформаційних властивостей параметрів біоелектричних вимірювальних сигналів несучих інформацію про біохімічні особливості біологічних і хімічних матеріалів, що піддаються динамічному факторному впливу. Доведено можливість ідентифікації виду біохімічного стану з урахуванням заданого ризику неправильних рішень. Отримано методика оцінки кількості очікуваної інформації для комплексних інформативних параметрів, що дозволяє ранжувати останнім за рівнем зменшення цієї інформації.

**Ключові слова:** біологічний об'єкт, факторна навантаження, інформативний параметр, динамічний експеримент, рівень значущості.

*Поступила (received) 08.06.2016*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА ПО КОСВЕННЫМ КЛИНИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Е. И. СОКОЛ<sup>1\*</sup>, С. С. ЛАПТА<sup>1</sup>, О. И. СОЛОВЬЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра промышленной и биомедицинской электроники, НТУ "ХПИ", Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Кафедра информационных технологий, ХУВС им. И.Кожедуба, Харьков, УКРАИНА

\*email: stas69@ukr.net

**АННОТАЦИЯ** На примере построения ранней объективной диагностики сахарного диабета второго рода продемонстрирована возможность определения значений внутренних диагностических параметров организма пациента по доступным для измерения клиническим данным, в чем нуждаются доказательная медицина и телемедицина. Задача решена путем построения соответствующей математической модели физиологической системы регуляции углеводного обмена и пересчета по ее алгоритму доступных для измерения гликемических данных перорального теста толерантности к глюкозе, имеющих косвенный интегральный характер, в необходимые для диагностики внутренние параметры инсулинорезистентности тканей.

**Ключевые слова:** диагностика, косвенные клинические данные, внутренние диагностические параметры, сахарный диабет, инсулинорезистентность, математическая модель.

## DETERMINATION OF INTERNAL DIAGNOSTIC PARAMETERS OF ORGANISM OF MAN FROM INDIRECT CLINICAL DATA

Е. I. SOKOL<sup>1</sup>, S. S. LAPTA<sup>1\*</sup>, O. I. SOLOVYOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Electronics, NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Information Technology, Kharkiv University of Air Force, Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** On the example of construction of early objective diagnostics of the Diabetes mellitus II type it is shown the possibility of determination of the internal diagnostic parameters values of the patient's organism from the available for measuring clinical data, having indirect integral character, in what evidential medicine and telemedicine need. At present these data are effectively used in intuitional expert medical diagnostics. Its success indicates that, in principle, the so effective extraction by the technical means the latent diagnostic data from the integral laboratory measurements is possible, thus in numeral kind. The task is decided by the construction of the corresponding one-compartmental mathematical model of the physiological system of the carbohydrate exchange regulation and on its algorithm the evaluation the accessible for measuring glycemic data of the glucose tolerance peroral test, having integral character, in necessary for diagnostics internal parameters of insulin-resistance of the tissues. The model offer itself the differential equation of the first order with delayed argument. When itself constructing, the functional-structural method of approach to model with detailing the model of the "black-box" level not in the morphological aspect, but only in functional aspect with partial revealing it's content was used. It is elucidated that early revealing the latent Diabetes mellitus II type according to internal diagnostic parameters values by effectiveness practically don't yield to the expert diagnostics, but excel it in possibility to carry out the differential diagnostics of this heterogeneous condition.

**Keywords:** diagnostics, indirect clinical data, internal diagnostic parameters, Diabetes mellitus, insulin-resistance, mathematical model.

### Введение

Современная медицина предполагает объективную диагностику организма человека по численным значениям функциональных параметров его физиологических систем. Однако, в настоящее время практически отсутствует возможность их непосредственного измерения для внутренних органов пациента [1, 2]. Исключение представляют лишь ультразвуковое и рентгеновское исследования, а также лабораторный анализ мочи и крови пациента. Эти данные дополняются сведениями из анамнеза пациента и интуицией врача-эксперта, позволяющей

извлечь из них необходимую диагностическую информацию.

Проблему недоступности для прямых измерений большинства физиологических переменных человека, необходимых для проведения диагностики состояния его организма, и повышения уровня ее объективности в последнее время пытаются разрешить на основе построения математических моделей физиологических процессов и пересчета с их помощью значений интегральных косвенных клинических данных, которые удалось измерить, в те, которые непосредственно необходимы для проведения диагностики [3].

### Цель работы

Продемонстрировать возможность косвенного определения внутренних параметров организма человека на основе компьютерной модельной обработки традиционных клинических данных на примере диагностики состояния системы регуляции углеводного обмена, нарушения в которой приводят к тяжелому эндокринному заболеванию сахарному диабету (СД).

### Изложение основного материала

Проблема пересчета значений интегральных косвенных клинических данных в диагностические данные, недоступные для непосредственного измерения, для ее решения требует построения соответствующей физиологически адекватной математической модели, пригодной для эффективного численного анализа. При этом, прежде всего, необходим обоснованный выбор математического аппарата описания физиологической системы и класса математической модели в соответствии с идеями Н. Винера и В. Глушкова [4, 5].

Известно, что для полного глубокого описания сложных систем необходимо привлечение аппарата теории вероятностей. Однако, как следует из опыта их исследования в физиологии, в них существует также обширный класс гомеостатических процессов, которые носят причинный или детерминированный характер. В частности, такими являются все процессы регуляции организма человека, осуществляемые гормонально-гуморальными средствами [6]. Необходимость описания причинно-следственных связей между переменными и их динамики требует привлечения аппарата дифференциальных уравнений.

Множество математических моделей конкретных биомедицинских систем разделяется на формальные и физиологически содержательные модели. При этом первые совершенно непригодны для диагностической цели в связи с формальным характером их параметров.

Содержательные математические модели биомедицинских систем с параметрами, номинально имеющими физиологический смысл, в свою очередь подразделяются на чисто феноменологические (функциональные), структурно-функциональные и функционально-структурные модели [5].

До последнего времени математическое моделирование биосистем развивалось в основном в рамках функционального и номинально содержательного структурно-функционального подходов. Последний предполагает морфологическую структуризацию сложной системы, применение к ее отдельным частям того же функционального подхода "черного ящика" и синтез полученного множества феноменологических моделей в интегральную модель всей системы. Необходимость в описании большого множества, часто дублирующих друг друга многофункциональных органов биосистемы и еще

большого числа их взаимосвязей при очень ограниченных возможностях экспериментальных измерений приводит к принципиальной гипотетичности ее структурно-функциональных моделей, проверить которую не представляется возможным. С другой стороны, избыточная детализация таких моделей, неадекватная возможностям методов их параметрической идентификации, сопряженная с известными проблемами сходимости и устойчивости численного решения систем дифференциальных уравнений высокого порядка, настолько повышает необходимый объем вычислений, что его трудно провести даже на современных мощных ЭВМ [7].

Функционально-структурный подход к математическому моделированию сложных физиологических систем впервые был предложен в классификации математических моделей биосистем В.М. Глушкова [5]. Он был определен как промежуточный между самым низким функциональным и структурно-функциональным иерархическими уровнями. В соответствии с ним структуризация и детализация функциональной модели проводится не в морфологическом, а лишь в функциональном аспекте с частичным раскрытием содержания "черного ящика".

Однако сформулированную более тридцати лет назад идею функционально-структурного подхода к математическому моделированию биосистем и пересчета традиционных клинических данных в значения диагностических внутренних параметров удалось реализовать лишь в последнее время при разработке семейства математических моделей системы регуляции углеводного обмена [3].

Известно, что СД — синдром хронической гипергликемии и глюкозурии, обусловлен инсулиновой недостаточностью (СД первого типа - СД1) либо резистентностью (невосприимчивостью) тканей к инсулину (СД второго типа - СД2) [8, 9]. При этом, в настоящее время нет никаких реальных возможностей для измерения в клинических условиях уровня главного регуляторного фактора углеводного обмена — инсулина [10]. Поэтому СД1, который возникает внезапно и сразу с явными признаками, не поддается ранней диагностике какими-либо средствами [11].

СД2 характерен вялым развитием с продолжительным латентным периодом, получившим название - нарушение толерантности к глюкозе (НТГ), состоянием, в течение которого развиваются типичные смертельно опасные поздние осложнения СД, но которое может и нормализоваться, нуждается в ранней диагностике [10]. При этом эмпирически установлено, что по динамике изменения концентрации глюкозы в крови (гликемии) можно как-то судить о секреции инсулина и о его восприимчивости тканями.

Медики разработали специальный пероральный тест толерантности к глюкозе (ПТТГ). Он состоит в измерении уровня гликемии на периферии (в капиллярной крови, взятой из пальца)



натощак, а затем, после приема внутрь глюкозной нагрузки в 75 г, еще несколько раз с интервалом в полчаса [12]. По гликемическим данным ПТТГ опытный эндокринолог проводит экспертную диагностику НТГ.

Поэтому при демонстрации возможностей определения внутренних диагностических параметров системы регуляции углеводного обмена по доступным клиническим данным мы ограничимся самой простой математической моделью регуляции углеводного обмена относительно уровня гликемии, в которой влияние всех основных физиологических факторов, включая и инсулин, учитывается опосредованно через глюкозу.

При построении этой модели целесообразно применить однокомпарментный подход, при котором все кровеносное русло рассматривается как однородная область с уровнем гликемии в нем таким, каким он в действительности является лишь на периферии.

Основанием для этого является возможность измерения уровня гликемии в клинических условиях только на периферии организма человека, а также известная быстрая циркуляция крови по замкнутому кровеносному руслу за промежуток времени около 1 минуты [13], ее перемешивание и установление единого уровня гликемии по компартменту крови.

Все противоположно направленные процессы поступления глюкозы в кровь и ее элиминации из крови, динамическое равновесие которых обеспечивает установление определенного равновесного уровня гликемии  $g(t)$  (в мг% - количество мг глюкозы на 100 мл крови), протекают в организме человека непрерывно с некоторыми интенсивностями, зависящими, в конечном счете, от значения самого этого уровня.

Большой научный интерес представляет задача установления этого равновесного уровня, в частности базального уровня  $g_b$  (после ночного голодания), исходя из удовлетворения энергетических потребностей организма, что является первичным сигналом в этой регуляции.

Однако, с учетом клинически установленной неизменности базального значения гликемии  $g_b$  у каждого пациента в течение длительного времени (по крайней мере, в течение года), для решения практических вопросов допустима упрощенная постановка задачи с заданной "уставкой"  $g_b$ .

При этом наличие базального уровня гликемии  $g_b$  берется за аксиому и затем исследуется лишь динамика отклонения  $y(t) = g(t) - g_b$  текущего уровня  $g(t)$  от него и возвращения к нему; а интенсивности всех процессов повышения и понижения текущего уровня гликемии представляются в виде слагаемых двух видов. Первые из них обеспечивают базальное равновесное состояние и не представляют интереса при такой постановке задачи. Все вторые составляющие интенсивности отмеченных процессов,

которые можно назвать дополнительными интенсивностями, равны нулю в базальном состоянии, а в других случаях обуславливают отклонение от него.

Поэтому в дальнейшем при составлении уравнения баланса уровня гликемии будем учитывать только эти дополнительные интенсивности процессов, повышающих и понижающих его.

Тогда можно считать, что большинство органов (каждая их клетка) потребляют глюкозу из крови лишь при избыточном уровне гликемии (выше базального значения), частично благодаря облегченной диффузии, а в основном посредством механизма, регулируемого инсулином, т.е. инсулинозависимым способом. При этом они используют ее как на текущую утилизацию, так и на собственную аккумуляцию в виде гликогена (в процессе гликогенеза), который затем при снижении уровня гликемии обращается (в процессе гликогенолиза) обратно в глюкозу для внутреннего потребления. К тому же эти органы при недостатке глюкозы в крови могут использовать для жизнеобеспечения и другие неуглеводные компоненты [13].

Печень осуществляет подобную функцию аккумуляции избыточной глюкозы в крови в гликоген централизованно для всей кровеносной системы и для всего организма, возвращая глюкозу назад в кровь при снижении уровня гликемии. Кроме того, печень может при необходимости превращать в глюкозу метаболиты жиров и белков в процессе глюконеогенеза. При этом гликогенез и инсулинозависимое потребление глюкозы тканями контролируются инсулином, а гликогенолиз и глюконеогенез – так называемыми контррегуляторными гормонами (глюкагоном, кортизолом, адреналином, тироксином и гормоном роста), которые в определенном смысле дублируют друг друга, повышая надежность предотвращения гипогликемии (значительного и, или длительного) снижения уровня гликемии ниже базального уровня), смертельно опасной для пациента. Поэтому гипогликемические нарушения в механизме регуляции углеводного обмена встречаются значительно реже, чем гипергликемические.

Однако некоторые ткани организма (клетки крови, нервная ткань, кишечник и почки) для жизнеобеспечения могут использовать только глюкозу. Они непрерывно потребляют ее посредством облегченной диффузии (инсулиннезависимо) и не имеют собственного механизма ее аккумуляции [13]. Т.е., их энергетическое обеспечение определяется текущим уровнем гликемии, для поддержания которого, в отсутствии экзогенного поступления глюкозы, ее количество в крови непрерывно восполняется печенью из гликогена и из неуглеводных предшественников.

Таким образом, интенсивности всех эндогенных физиологических процессов, формирующих в совокупности уровень гликемии, регулируются нейрогормональными средствами, которые в свою очередь определяются уровнем гликемии и динамикой

его изменения. Поэтому можно говорить о механизме саморегуляции уровня гликемии, приводящем его к норме (к базальному значению) при любых его отклонениях от нее. В результате проведенного анализа было построено уравнение баланса гликемии в виде дифференциального уравнения 1-го порядка с запаздыванием:

$$\begin{aligned} y'(t) &= \varphi(t) = (1 - \chi_1 \cdot \alpha) \cdot f(t) - \chi_2 \cdot \beta \cdot y(t - \tau - 1) - \\ &- k \cdot Es(y(t - 1)), \quad t \geq 0, \\ y(t) &= \phi(t) = 0, \quad -\tau \leq t \leq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $t$  – текущее время в минутах,  $Es(z) = ze(z)$  – пороговая функция, где  $e(z)$  – единичная функция Хевисайда,  $\alpha$  – параметр, интегрально характеризующий интенсивность первой (острой) фазы секреции инсулина поджелудочной железой и ее восприимчивость тканями в норме, аналогичный смысл имеет параметр  $\beta$  для интенсивности второй фазы секреции инсулина, коэффициенты  $\chi_1, \chi_2$  перед ними описывают возрастную инсулинорезистентность тканей (при этом, поскольку точное значение интенсивности эндогенного производства глюкозы не имеет значения при диагностике патологий секреции и восприимчивости инсулина, допустимо было приписать ее параметрам значения, свойственные инсулину, и объединить ее со второй составляющей инсулинозависимой утилизации глюкозы),  $\tau$  – время запаздывания второй фазы секреции инсулина, дополнительное запаздывание в одну минуту обусловлено временем оборота крови по кровеносному руслу и ее перемешивания, параметр  $k$  интегрально характеризует интенсивность инсулинонезависимой утилизации глюкозы и глюкозурии,  $f(t)$  – интенсивность экзогенного поступления глюкозы в кровеносное русло при ее пероральном приеме, нормированная на 100 мл крови, которая по работе [3] хорошо описывается трапециевидным импульсом с экспоненциально убывающим задним фронтом:

$$f(t) = H \cdot \begin{cases} 0, & t < 0, \\ t/d, & 0 \leq t < d, \\ 1, & d \leq t < T, \\ \exp(-m(t-T)), & t \geq T, \end{cases} \quad (2)$$

где  $H$  – максимальная интенсивность всасывания глюкозы в кишечнике,  $d$  – продолжительность переднего фронта импульса,  $T$  – время переднего фронта импульса и его плоской вершины вместе,  $m$  – параметр интенсивности экспоненциального спадания заднего фронта импульса. В норме для ПТТГ эти параметры имеют такие значения:  $d = 5 \text{ мин}$ ,  $m = 0.1 \text{ мин}^{-1}$ ,  $T = 35 \text{ мин}$ ,  $H = 26,10 \text{ мг}\% \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Уравнение (1) принадлежит к классу дифференциальных уравнений 1-го порядка с запаздывающим аргументом. Для единственности

решения оно дополняется начальной функцией  $\phi(t)$  на промежутке времени длиной  $\tau$ , который предшествует началу – нулевому моменту. В случае ПТТГ  $\phi(t) \equiv 0$ .

Метод численного анализа полученной модели заключается в традиционном переходе к сеточным функциям дискретного аргумента в узлах разностной сетки и нахождении их значений в новых узлах через уже известные их значения в предыдущих узлах благодаря наличию запаздывания.

Как видно, модель (1) содержит неопределенные параметры в связи с вариабельностью соответствующих характеристик у разных пациентов. Индивидуализация модели к конкретному пациенту (идентификация вектора ее параметров  $X(\alpha, \beta, \chi_1, \chi_2, \tau, k)$  проводится по его клиническим данным ПТТГ). Критерий близости расчетных модельных и клинических данных пациента оценивается в соответствии с методом наименьших квадратов по функционалу невязки между вычисленными  $y(t_m, X)$  и клиническими  $y_k(t_m)$  значениями гликемии с дополнительной нормировкой на число измерений  $N$ :

$$F(X) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{m=1}^N \left| \frac{y(t_m, X) - y_k(t_m)}{y(t_m, X)} \right|^2}. \quad (3)$$

Решение задачи минимизации целевой функции (3) проведено комбинацией прямых и градиентных методов в операционной среде Matlab-6.5.

### Обсуждение результатов

При проведении многочисленных численных экспериментов с имитационной моделью (1) и исследовании свойств ее параметров было установлено однозначное соответствие между их значениями и расчетными гликемическими кривыми.

При этом полученные значения параметров модели, индивидуализированной к пациенту, могут служить объективными характеристиками состояния системы регуляции углеводного обмена у него.

Это обеспечило возможность проведения эффективной идентификации параметров модели по клиническим данными ПТТГ. На рис. 1 для наглядности представлены типичные клинические гликемические данные ПТТГ пациента и соответствующая им модельная кривая, полученная при параметрической идентификации модели по ним.

При разработке диагностики состояния системы регуляции углеводного обмена на основе значений параметров модели (1), индивидуализированной к пациенту, для снижения размерности задачи параметрической идентификации целесообразно было ограничиться случаем нормальной функции всасывания глюкозы в кишечнике (2). Кроме того, поскольку секреция инсулина в организме, за исключением случаев

явных СД1 и СД2, а также инсулиномы, которые не рассматриваются, находится в норме и практически одинакова у всех пациентов, идентификация параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k$ ,  $\tau$  была проведена лишь для нахождения их нормальных значений  $\alpha_n = 0,950$ ,  $\beta_n = 0,009 \text{ мин}^{-1}$ ,  $k_n = 0,013 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\tau_n = 60 \text{ мин}$  по клиническими данными ПТТГ здоровых пациентов возраста 21-30 лет из работы [14], у которых заведомо отсутствовала инсулинорезистентность тканей. При этом расчетная гликемическая кривая ПТТГ обследуемого пациента практически взаимно однозначно определяется уже значениями лишь трех параметров модели  $g_b$ ,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ .

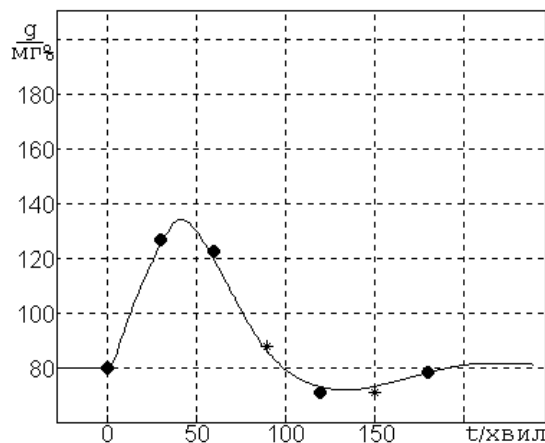


Рис. 1 – Сравнение с клиническими данными ПТТГ пациента расчетной гликемической кривой модели (1), индивидуализированной по этим данным, при значении целевой функции (3), равном 0,026.

Для проведения ранней диагностики СД2 (НТГ) по значениям диагностических параметров ( $g_b$ ,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ) было принято соглашение о том, что интегральный вывод о НТГ принимается в случае, если такой парциальный диагноз есть хотя бы по одному из них. При этом парциальный диагноз по традиционному параметру  $g_b$  берется в традиционном виде.

Для нахождения диагностической границы НОРМА / НТГ по значениям параметров  $\chi_1$  и  $\chi_2$  были использованы гликемические данные ПТТГ 185 пациентов, полученные в клинике Института проблем эндокринной патологии АМН Украины, с поставленным экспертным диагнозом НОРМА (98) и НТГ (87). Каждое из этих множеств было разбито на два подмножества: учебное – 50 с НОРМОЙ и 40 с НТГ и тестовое – 48 с НОРМОЙ и 47 из НТГ. Учебные множества были использованы для нахождения диагностических критериев по параметрам  $\chi_1$  и  $\chi_2$ ; тестовые множества – для выяснения эффективности способа диагностики.

При этом оказалось, что эффективность выявления НТГ по значениям диагностических

параметров ( $g_b$ ,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ) практически не уступает экспертной диагностике. Но теперь появилась возможность проведения дифференциальной диагностики НТГ по разным сочетаниям значений диагностических параметров с соответствующим прогнозом развития диабета.

## Выводы

Из приведенных результатов, полученных в частном случае построения математической модели системы регуляции углеводного обмена, следует, что на основе такой модели, индивидуализированной к пациенту по его интегральным клиническим данным, доступным для измерения, возможно определение значений его внутренних диагностических параметров.

## Список литературы

- 1 **Breton, M.** Analysis, modeling, and simulation of the accuracy of continuous glucose sensors / **M. Breton, B. Kovatchev** // *J Diabetes Sci Technol.* – 2008. – № 2. – P. 853-862. – doi: 10.1901/jaba.2008.2-853.
- 2 **Leal, Y.** Real-time glucose estimation algorithm for continuous glucose monitoring using autoregressive models / **Y. Leal, W. Garcia-Gabin, J. Bondia** et al // *J. Diabetes Sci Technol.* – 2010. – № 4. – P. 391-403.
- 3 **Лапта, С. И.** Функционально-структурное математическое моделирование сложных гомеостатических систем: монография / **С. И. Лапта, С. С. Лапта, О. И. Соловьева** // Харьков : Изд. ХНЭУ. – 2009. – 332 с.
- 4 **Винер, Н.** Кибернетика или управление и связь в животном и машине / **Н. Винер** // М.: Сов. радио. – 1968. – 328 с.
- 5 **Методы математической биологии. Книга 1. Общие методы анализа биологических систем.** – К.: ВШ. – 1980. – 240 с.
- 6 **Начала физиологии** / Под ред. акад. **А.Д. Ноздрачева** // – СПб.: Изд. "Лань". – 2001. – 1088 с.
- 7 **Madsen, H.** Introduction to General and Generalized Linear Models / **H. Madsen** // Boca Raton, FL: CRC Press. – 2011. – 438 p.
- 8 **Schaps, K. P.** Innere Medizin / **K. P. Schaps, O. Kessler, U. Fetzner** // *Springer Medizin Verlag Heidelberg.* – 2007. – 325 p.
- 9 **Dalla Man C.** Meal simulation model of the glucose-insulin system / **Man C. Dalla, R. A. Rizza, C. Cobelli** // *IEEE Trans Biomed Eng.* – 2007. № 54. – P. 1740-1749. – doi: 10.1109/TBME.2007.893506.
- 10 **Балаболкин, М. И.** Диабетология / **М. И. Балаболкин** // – М.: Медицина. – 2000. – 672 с.
- 11 **Эндокринология** / За ред. **П. М. Боднара** // К.: Здоров'я. – 2002. – 512 с.
- 12 **Standards of Medical Care in Diabetes** // *Diabetes Care* – 2015. – Vol. 38, Supplement 1, January 2015. – P. 1-94.
- 13 **Агаджанян, Н. А.** Основы физиологии человека / **Н. А. Агаджанян, И.Г. Власова, Н.В. Ермакова** и др. // М.: РУДН. – 2003. – 408 с.
- 14 **Погожев, И. Б.** Определение и анализ персональных параметров системы регулирования содержания сахара

в крови / **И. Б. Погожев, Т. Х. Агисhev** // М.: ОВМ АН СССР. – 1991. – 48 с.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Breton, M., Kovatchev, B.** Analysis, modeling, and simulation of the accuracy of continuous glucose sensors *J Diabetes Sci Technol*, 2008, **2**, 853-862, doi: 10.1901/jaba.2008.2-853.
- 2 **Leal, Y., Garcia-Gabin, W., Bondia, J.** Real-time glucose estimation algorithm for continuous glucose monitoring using autoregressive models, *J Diabetes Sci Technol*, 2010, **4**, 391-403.
- 3 **Lapta, S. I., Lapta, S. S., Soloveva, O. I.** Funktsionalno-strukturnoe matematicheskoe modelirovanie slozhnyih gomeostaticeskikh sistem: monografiya, *Kharkov : Izd. HNEU*, 2009, 332 p.
- 4 **Viner, N.** Kibernetika ili upravlenie i svyaz v zhyvotnom i mashine, *Moskov: Sov. radio*, 1968, 328 p.
- 5 **Metodyi matematicheskoy biologii. Kniga 1. Obschie metodyi analiza biologicheskikh sistem**, *Kyiv: VSh*, 1980, 240p.
- 6 **Pod red. akad. Nozdracheva A.D.**, Nachala fiziologii, *SanktPiterburg: Izd. "Lan"*, 2001, 1088 p.
- 7 **Madsen H.**, Introduction to General and Generalized Linear Models *Boca Raton, FL: CRC Press*; 2011, 438 p.
- 8 **Schaps K.P., Kessler O., Fetzner U.**, Innere Medizin, *Springer Medizin Verlag Heidelberg*, 2007, 325 p.
- 9 **Dalla Man C., Rizza R. A., Cobelli C.**, Meal simulation model of the glucose-insulin system, *IEEE Trans Biomed Eng*, 2007, **54**, 1740-1749, doi: 10.1109/TBME.2007.893506.
- 10 **Balabolkin M. I.**, Diabetologiya, *Moskov: Meditsina*, 2000, 672 p.
- 11 **Za red. Bodnara, P. M.** Endokrinologiya, *Kyiv: Zdorov'ya*, 2002, 512 p.
- 12 Standards of Medical Care in Diabetes *Diabetes Care*. 2015, **38**, 1-94.
- 13 **Agadzhanian, N. A., Vlasova, I. G., Ermakova, N. V.** Osnovy fiziologi cheloveka, *Moskov: RUDN*, 2003, 408p.
- 14 **Pogozhev, I. B., Agishev, T. H.** Opredelenie i analiz personalnyih parametrov sistemyi regulirovaniya soderzhaniya sahara v krovi, *Moskov: OVM AN SSSR*, 1991, 48p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Сокол Евгений Иванович** – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, заведующий кафедрой промышленной и биомедицинской электроники, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Sokol Yevgen Ivanovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department of Industrial Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: sokol@kpi.kharkov.ua.

**Лапта Станислав Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, кафедра промышленной и биомедицинской электроники, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: stas69@ukr.net.

**Lapta Stanislav Sergeevich** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of Industrial Electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: stas69@ukr.net.

**Соловьёва Ольга Игоревна** – кандидат технических наук, кафедра информационных технологий, ХУВС им. И.Кожедуба, г. Харьков, Украина; e-mail: olga01@ukr.net.

**Solovyova Olga Igorevna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information Technologie, Kharkiv University of Air Force, Kharkov, Ukraine; e-mail: olga01@ukr.net.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Сокол, Е. И.** Определение внутренних диагностических параметров организма человека по косвенным клиническим данным / **Е. И. Сокол, С. С. Лапта, О. И. Соловьёва** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 87-92. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.13.

*Please cite this article as:*

**Sokol, Y., Lapta, S., Solovyova, O.** Determination of internal diagnostic parameters of organism of man from indirect clinical data. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 87-92, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.13.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Сокол, Е. И.** Визначення внутрішніх діагностичних параметрів організму людини за непрямими клінічними даними / **Є. І. Сокол, С. С. Лапта, О. І. Соловьова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 87-92. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.13.

**АНОТАЦІЯ** На прикладі побудови ранньої об'єктивної діагностики цукрового діабету другого роду продемонстрована можливість визначення значень внутрішніх діагностичних параметрів організму пацієнта за доступними для виміру клінічними даними, чого потребують доказова медицина й телемедицина. Задача вирішена шляхом побудови відповідної математичної моделі фізіологічної системи регуляції вуглеводного обміну й перерахування за її алгоритмом доступних для виміру глікемічних даних перорального тесту толерантності до глюкози, які мають побічний інтегральний характер, у необхідні для діагностики внутрішні параметри інсулінорезистентності тканин.

**Ключові слова:** діагностика, побічні клінічні дані, внутрішні діагностичні параметри, цукровий діабет, інсулінорезистентність, математична модель.

Поступила (received) 08.06.2016

УДК 621.317.332

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.14

## АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНТРОЛЯ СТАТУСА ГІДРАТАЦІЇ ПАЦІЄНТА ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕДУРИ ГЕМОДІАЛІЗА

**Б. В. ТКАЧУК\***

Областной клинический центр урологии и нефрологии им. В.И. Шаповала, Харьков, УКРАИНА  
\*email: bog.tkachuk@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** В данной статье описана проблема оценки водного статуса пациентов на гемодиализе. Показана важность обретения пациентом состояния нормогидратации или «сухого веса» и опасность при его отсутствии. Разработана структура системы для контроля статуса гидратации, описана функциональная схема, устройство и принцип работы ее блоков. Разработан алгоритм работы системы, основанный на физико-биологических процессах происходящих в организме пациента при ультрафильтрации. Выполнено компьютерное моделирование подтверждающее адекватность разработанного алгоритма.

**Ключевые слова:** «сухой вес», биоимпеданс, гемодиализ, гидратация, гипергидратация, ультрафильтрация.

## AUTOMATION CONTROL STATUS HYDRATION OF PATIENTS DURING HEMODIALYSIS

**В. ТКАЧУК**

V. I. Shapoval's regional clinical center of urology and nephrology, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** In this article the problem of assessing the water status of patients on hemodialysis described. The importance of obtaining a patient's condition normohydration or "dry weight" is shown. Also, the risk of lack of "dry weight" in patients with kidney disease is described. The purpose of the development of the system has to monitor the patient's hydration status, based on a mathematical model describing the processes in the body fluid during hemodialysis procedure. Also automated algorithm ultrafiltration removing liquid should be developed. The structure of the system to monitor hydration status is developed. Hemodialysis machine, apparatus bioimpedancemeter and to determine the "dry weight" make up this system. The block diagram shows a commercially available bioimpedance. Furthermore, the apparatus and the principle of their operation are described. The algorithm of the system based on the physical and biological processes occurring in the body of the patient with ultrafiltration built. Hematocrit is the main factor of the state of the vascular fluid selected. Expression hematocrit calculation of the variable component of bioimpedance found. Separation of all time on dialysis three stages proposed. Also control the rate of removal of excess fluid vascular and interstitial fluid during hemodialysis offered. Computer modeling of the new algorithm is satisfied. Adequacy is shown. The need for further experimental studies of the system and algorithm specified.

**Keywords:** "dry weight", bioimpedance, dialysis, hydration, hyperhydration, ultrafiltration

### Введение

Одной из приоритетных процедур для пациентов с острой (ОПН) или хронической (ХПН) почечной недостаточностью, является гемодиализ (ГД) с ультрафильтрацией (УФ), проведенный с помощью аппарата «искусственная почка» (ИП) [1]. В процессе УФ происходит удаление излишков жидкости накопленных в организме пациента за междуализный период или за время в течении которого функции почек были утрачены [2].

По статусу гидратации пациентов с ОПН/ХПН можно разделить на три группы: гипергидратированные – пациенты с наличием избытка жидкости в организме, нормогидратированные – пациенты, имеющие нормальный водный баланс или имеющие «сухой вес», а также гипогидратированные – имеющие объем внеклеточной жидкости меньше нормы [3]. Корректно проведенная УФ позволяет пациенту избавиться от симптомов гипергидратации и обрести «сухой вес». При этом

восстанавливаются обменные процессы и физиологические показатели, а в случае ОПН также восстанавливается нормальная работа почек [4].

Основными параметрами задания УФ для работы аппарата ИП, являются объем и скорость удаления ультрафильтрата. На сегодняшний день существует большое количество методик для определения и расчета объема излишков жидкости [5-7]. Одни основаны на вычислении междуализной прибавки в весе, другие на измерении изменения артериального давления, центрального венозного давления, биоимпеданса и биохимического анализа крови. Однако, единого подхода к измерению «сухого веса» так и критерия его достижения на данный момент не выработано.

Корректное определение параметров ультрафильтрации позволяют ИП безболезненно и бессимптомно скачать из организма пациента излишек жидкости.

Главной проблемой при определении параметров УФ есть распределение ультрафильтрата в

объемах сосудистой (СЖ) и интерстициальной жидкостей (ИЖ). СЖ и ИЖ, в свою очередь, являются составляющими частями внеклеточной жидкости. Для приведения пациента в состояние нормогидратации при процедуре УФ, необходимо одновременно следить за изменением объемов ИЖ и СЖ [8]. Так как неправильно подобранная скорость УФ может произвести к критическому сгущению СЖ (крови) и появлению интрадиализных осложнений. Кроме того, для адекватного проведения процедуры гемодиализа необходимо разработать критерий, по которому однозначно можно определить в какой момент следует прекратить УФ.

**Цель работы**

Цель работы: разработка системы для контроля статуса гидратации пациента, основанной на математической модели описывающей жидкостные процессы в организме при процедуре гемодиализа, а также алгоритма автоматизированного удаления жидкости при ультрафильтрации.

**Разработка системы для контроля статуса гидратации пациента при ГД**

Одним из перспективных и используемых на сегодняшний день методов контроля водного баланса, является биоимпедансометрия (БИМ) [9]. Это неинвазивный, дешевый, достаточно точный метод [10], позволяющий на основе параметров измеренного интегрального биоимпеданса организма, производить мониторинг изменения объема жидкости в нем. Мировая промышленность выпускает большое количество биоимпедансометрических приборов (БИМр) со схожей структурой и принципом действия [11], различие состоит лишь в количестве измеряемых показателей и способом вывода информации. Базовая структурная схема большинства серийно выпускаемых приборов представлена на рис. 1.

Управляющую и контролирующие функции в БИМр выполняет микроконтроллер (МК). Генератор задающего тока (ГЗТ) функционально состоит из программируемого генератора (ПГ) и преобразователя напряжение - ток (У/І). ПГ генерирует синусоидальный сигнал относительно низкой частоты  $f1$  (30 кГц) и относительно высокой  $f2$  (500 кГц). Переменный зондирующий ток, заданной частоты, через блок коммутации и защиты пациента (БКЗ 1) подается на токовые электроды пациента. Сигнал, снимаемый с потенциальных электродов, через блок коммутации и защиты (БКЗ 2) подается на фазовый детектор (ФД), с него на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а далее в МК. С микроконтроллера, через специальный интерфейс, данные могут быть переданы как на персональный компьютер (ПК), так и на штатный семисегментный или жидкокристаллический индикатор.

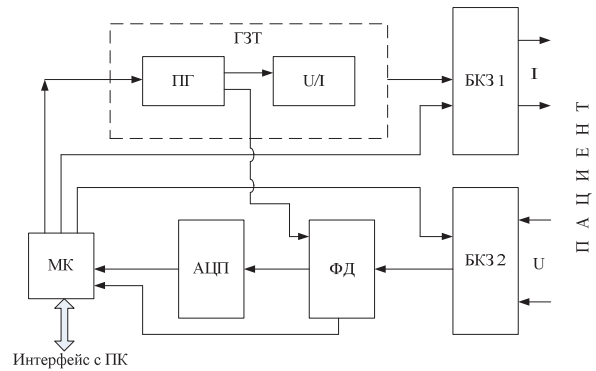


Рис. 1 – Структурная схема БИМр

Для обеспечения электрической безопасности пациента и контроля контакта электрод-кожа, МК производит контроль межэлектродного сопротивления и тока. При превышении тока сканирования, МК посредством блоков коммутации и защиты, отключает токовые электроды прибора от пациента. Блок питания (БП) обеспечивает все узлы прибора необходимыми напряжениями.

Измеренные БИМр параметры биоимпеданса не могут непосредственно подаваться на ИП, так как такая возможность не закладывается заводами – изготовителями ИП. Для решения задачи контроля статуса гидратации при УФ, необходима разработка прибора для определения «сухого веса» пациента (ПОСВ), который должен иметь возможность объединить в единую систему аппарат ИП и БИМр.

Функциональная схема системы для контроля статуса гидратации пациента представлена на рис. 2. Где ПОСВ производит обработку входных данных с ИП и БИМр и осуществляет выдачу инструкций о ходе процедуры медицинскому персоналу.

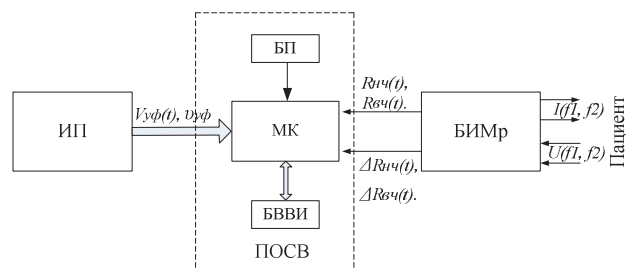


Рис. 2 – Функциональная схема системы для контроля статуса гидратации пациента

В ПОСВ со стороны БИМр, в каждый момент времени  $t$ , приходят данные о значении биоимпеданса на низкой  $R_{ni}(t)$  и высокой частотах  $R_{ei}(t)$ , а также о переменной составляющей биоимпеданса на низкой и высокой частотах  $\Delta R_{ni}(t)$ ,  $\Delta R_{ei}(t)$ .

Со стороны аппарата ИП в ПОСВ приходит информация о фактически удаленной в процессе УФ жидкости  $V_{uf}(t)$  и скорости УФ ( $v_{uf}$ ) в момент времени  $t$ .

При помощи выражения для расчета гематокрита [12] из значений измеренной переменной составляющей импеданса на обеих частотах, рассчитывается значение уровня гематокрита в каждый момент времени  $Ht(t)$ . Данные параметры отслеживаются и передаются в ПОСВ для последующей обработки согласно разработанному алгоритму.

**Разработка алгоритма безопасной ультрафильтрации и мониторинг достижения пациентом «сухого веса»**

Для практического применения метода диагностики статуса гидратации пациента, необходима выработка алгоритма действий построенного на физиологических особенностях строения тела человека и процессов, происходящих в его организме при процедуре УФ.

Из проведенного литературного обзора установлено, что в реальных условиях, в организме пациента на ГД, зависимости  $V_{уф/сж}(t)$  и  $V_{уф/иж}(t)$  носят плавно изменяющийся характер [13, 14], но для удобства, в данной модели условно разделим весь временной интервал процедуры УФ на три характерных этапа (рис 3), имеющих временные рамки см. табл. 1.

Таблица 1 – Временные рамки этапов УФ

| Длительность этапа в процентном соотношении от времени ГД | I Этап   | II Этап   | III Этап |
|---|----------|-----------|----------|
|   | 6 - 10 % | 83 - 90 % | 4 - 6 %  |

I этап: пациент гипергидратирован, происходит заполнение диализной магистрали кровью (участок 2); после начала ГД удаляются излишки жидкости, переполняющие сосудистое русло (участок 3).

II этап: при уменьшении гидравлического сопротивления сосудистого русла, возрастает влияние гидростатического давления ИЖ, которое восполняет сосудистый сектор (участок 4). Таким образом, в основном удаляется ИЖ. Объем СЖ изменяется незначительно.

III Этап: ультрафильтрат ИЖ полностью удален или снизилась скорость восполнения сосудистого русла  $Q$ . Происходит резкое уменьшение объема плазмы (участок 5). Необходима остановка УФ, коррекция скорости ультрафильтрации или небольшая пауза, которая позволит восполнить сосудистое русло.

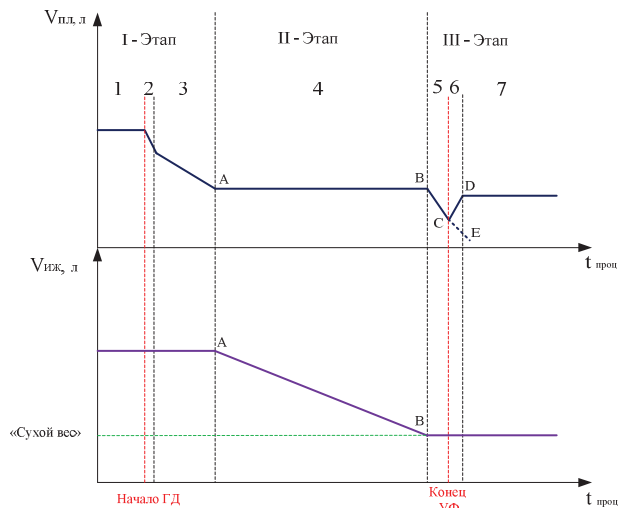


Рис. 3 – Алгоритм удаления ультрафильтрата из плазмы и ИЖ

На всех трех этапах процедуры УФ необходим контроль одновременно за объемами ИЖ и СЖ. Особенно важен для мониторинга третий этап, так как именно при нем происходит обретение пациентом «сухого веса».

Так как абсолютные значения объемов ИЖ и СЖ нам не известны, то по вышеуказанному алгоритму можно мониторить изменение первых производных этих объемов, которые являются скоростями удаления ультрафильтрата из соответствующих секторов ( $v_{уф/иж}$ ,  $v_{уф/пл}$ ):

$$v_{уф/иж} = \frac{dV_{уф/иж}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{уф/пл} = \frac{dV_{уф/пл}}{dt} \quad (3)$$

причем:

$$v_{уф} = v_{уф/пл} + v_{уф/иж} \quad (4)$$

Значения скоростей  $v_{уф/пл}$  и  $v_{уф/иж}$  также невозможно определить аналитически, но есть возможность вычислить приведенное значение скорости ультрафильтрата СЖ  $Rv_{уф/пл}$ , через параметр гематокрита:

$$Rv_{уф/пл} = \frac{v_{уф/пл}}{v_{уф/пл0}} = \frac{Ht_t - Ht_0}{Ht_t(1 - Ht_0)}; \quad (5)$$

где  $v_{уф/пл0}$ ,  $Ht_0$  – скорость удаления ультрафильтрата из СЖ и значение гематокрита в первый момент времени процедуры,  $Ht_t$  – значение гематокрита в момент времени процедуры  $t$ .

Рассчитав, по имеющимся данным, переданным из аппарата ИП, приведенную к  $v_{уф/пл0}$  скорость УФ:

$$Rv_{уф} = \frac{v_{уф}}{v_{уф/пл0}}; \quad (6)$$

рассчитаем приведенное к  $v_{уф/пл0}$  значение скорости ультрафильтрата ИЖ:

$$Rv_{уф/иж} = \frac{v_{уф}}{v_{уф/пл0}} - \frac{v_{уф/пл}}{v_{уф/пл0}}; \quad (7)$$

Параметры  $Rv_{уф/иж}$  и  $Rv_{уф/пл}$  обрабатываются микроконтроллером ПОСВ в течении всей процедуры УФ и исходя из алгоритма (рис. 3), МК выдает инструкции мед. персоналу для принятия окончательного решения о продолжении или остановке УФ.

### Моделирование возможных вариантов течения процедуры УФ

Для проверки возможности использования параметров  $Rv_{уф/иж}$  и  $Rv_{уф/пл}$  в качестве критерия нахождения «сухого веса», было проведено компьютерное моделирование в пакете MathCad по сравнению абсолютных и приведенных к  $v_{уф/пл0}$  параметров скоростей ультрафильтрации.

Объемы ультрафильтрата СЖ и ИЖ при моделировании соотносятся как 30/70% соответственно.

На рис. 4 приведено зависимости абсолютного значения скоростей УФ от времени процедуры, при постоянной и изменяющихся скоростях.

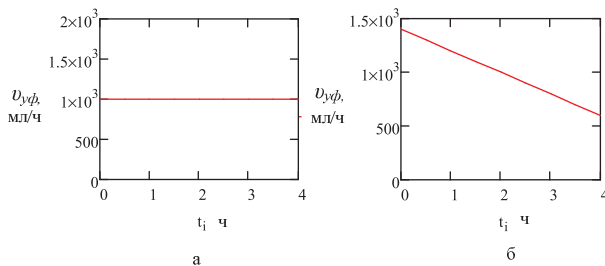


Рис. 4 – Зависимости абсолютных значений скорости УФ от времени процедуры:  
а – при постоянной скорости, б – при изменяющейся скорости

Характер зависимостей приведенных значений скоростей УФ (б) ко времени процедуры (рис.5), соответствует характеру зависимостей абсолютных величин при постоянной и изменяющейся скоростях УФ (рис. 4).

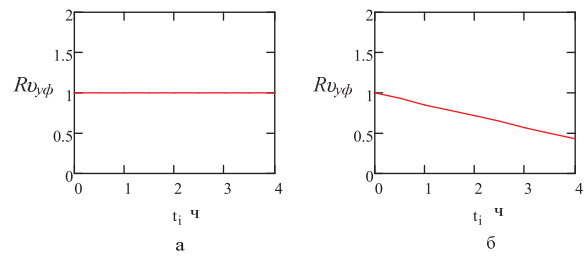


Рис. 5 – Зависимости приведенных значений скорости УФ от времени процедуры:  
а – при постоянной скорости, б – при изменяющейся скорости

При сравнении характеров зависимостей абсолютных (рис. 6) и приведенных (рис. 7) величин значений скоростей УФ из СЖ и ИЖ, при постоянной скорости УФ, установлено их соответствие.

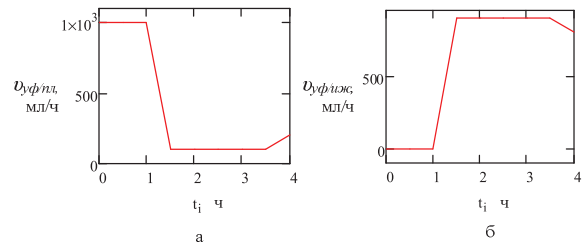


Рис. 6 – Диаграммы изменения абсолютных значений скоростей УФ: а – из СЖ, б – из ИЖ, при постоянной скорости УФ

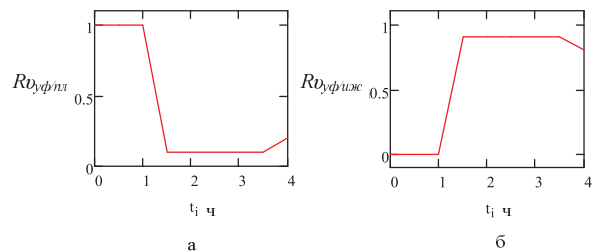


Рис. 7 – Диаграммы изменения приведенных значений скоростей УФ: а – из СЖ, б – из ИЖ, при постоянной скорости УФ

При сравнении характеров зависимостей абсолютных (рис. 8) и приведенных (рис. 9) величин значений скоростей УФ из СЖ и ИЖ, при постоянной скорости УФ, установлено их соответствие.



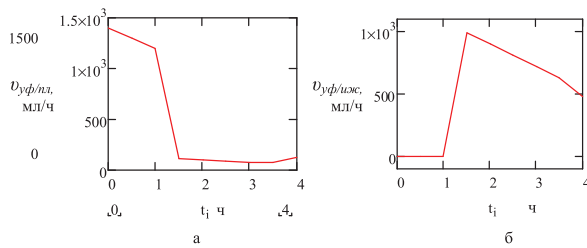


Рис. 8 – Диаграммы изменения абсолютных значений скоростей УФ: а – из СЖ, б – из ИЖ, при изменяющейся скорости УФ

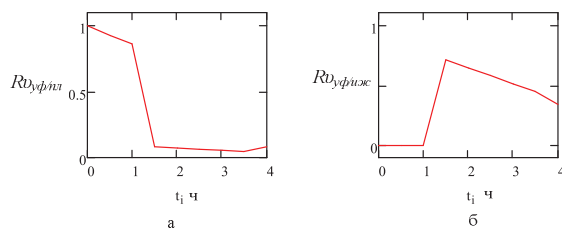


Рис. 9 – Диаграммы изменения приведенных значений скоростей УФ: а – из СЖ, б – из ИЖ, при изменяющейся скорости УФ

Проведенное моделирование показало соответствие приведенных значений скоростей УФ абсолютным, при постоянной и изменяющейся скорости УФ. Таким образом, значения параметров  $Rv_{uf/иж}$  и  $Rv_{uf/пл}$  могут служить в качестве критерия для нахождения «сухого веса» при использовании разработанного алгоритма (рис. 3)

### Выводы

В данной работе разработана структура системы для определения и контроля статуса гидратации пациента на гемодиализе. Описано устройство и принцип работы блоков системы.

Также разработан алгоритм безопасного удаления жидкости, основанный на физиологических принципах и процессах происходящих в организме пациента при ультрафильтрации. Ключевым элементом алгоритма является вычисление уровня гематокрита из измеренных прибором биоимпедансометром значений переменной составляющей импеданса тела. Гематокрит, в свою очередь, является характеристическим показателем состояния сосудистой жидкости, а его мониторинг дает возможность оценить приведенные к  $v_{uf/пл0}$  скорости изменения объемов СЖ и ИЖ.

Проведенное компьютерное моделирование показало возможность применения в качестве критерия для определения «сухого веса» пациента приведенных параметров  $Rv_{uf/иж}$  и  $Rv_{uf/пл}$ .

Для внедрения данной системы и алгоритма в практику, необходимо проведение экспериментальных

исследований с использованием эталонных средств измерения объема сосудистой и внеклеточной жидкостей, а также биоимпеданса.

### Список литературы

- 1 **Walter, H. H.** Replacement of renal function by dialysis / **H. H. Walter** // Springer. – 2004. – 1606 p.
- 2 **Даугирдас Джон Т.** Руководство по диализу / **Даугирдас Джон Т., Блейк Питер Дж., Тодд С. Инг;** пер. с англ. А.Ю. Денисова, В.Ю. Шило. – М.: Центр Диализа. – 2003. – третье издание.
- 3 **Rose, B. D.** Clinical physiology of acid–base and electrolyte disorders / **B. D. Rose** // *Medical Pub. Division.* – New York.: McGraw-Hill. – 2001.
- 4 **Стецюк, Е. А.** Основы гемодиализа / **Стецюк Е. А.** – М.: Издательский дом ГЭОТАР-МЕД. – 2001. – 392 с.
- 5 **Николаев, Д. В.** Биоимпедансный анализ состава тела человека / **Д. В. Николаев, А. В. Смирнов, И. Г. Бобринская, С. Г. Руднев** \ М.: "Наука". – 2009. – 392 с.
- 6 **Martinsen, O. G.** Gravimetric Method for in Vitro Calibration of Skin Hydration Measurements / **O. G. Martinsen, G. Orjan S. Grimnes** // *Biomedical Engineering, IEEE Transactions.* – 2008. – 55 (2). –v P. 728-732. – doi: 10.1109/TBME.2007.912651.
- 7 **Мальшев, В. Д.** Интенсивная терапия / **В. Д. Мальшев, И. В. Веденина, Х.Т. Омаров и др.** // Под ред. Проф. В.Д. Мальшева. – М.: Медицина. – 2002. – 584 с.
- 8 **Сокол, Е. И.** Аппаратный контроль степени гидратации пациента при процедуре гемодиализа / **Е. И. Сокол, Р. С. Томашевский, Б. В. Ткачук** // *Вестник южноукраинского национального университета им. В.И. Даля.* – Луганск. – 2012. – №18(189). – С. 227-233.
- 9 **Grimnes, S.** Bioimpedance and electricity basics / **S. Grimnes, Ø. G. Martinssen** // *Academic Press.* – 2000. – 471 p.
- 10 **Jaffrin, M. Y.** Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods // **M.Y. Jaffrin H. Morel** // *Med. Eng. Phys.* – 2008. – № 30(10). – P. 1257 - 69. – doi: 10.1016/j.medengphy.2008.06.009.
- 11 **Yuxing Yang** Design and preliminary evaluation of a portable devise for the measurement of bioimpedance spectroscopy / **Yuxing Yang, J. Wang, Gang Yu, Feilong Niu and et.** // *Physiol. Meas.* – 2006. – № 27. – P. 1293-1310. – doi: 10.1088/0967-3334/27/12/004.
- 12 **Тестов, А. Л.** Биотехническая система оценки количества жидкости в организме и распределение ее по секторам в реальном времени: дис. на соискание степени кандидата техн. наук: 05.11.17 / Тестовым Артемом Леонидовичем. – Томск. – 2004. – 133 с.
- 13 **Spiegel, D. M.** Bioimpedance resistance ratios for the evaluation of dry weight in hemodialysis / **D. M. Spiegel, K. Bashir, B. Fisch** // *Clin. Nephrol.* – 2000. – № 53. – P. 108-114.
- 14 **Castellano, S.** Clinical, analytical and bioimpedance characteristics of persistently overhydrated haemodialysis patients / **Sandra Castellano, Inés Palomares, Manuel Molina and et.** // *Nefrologia.* – 2014. – № 34(6). – P. 716-23. – doi: 10.3265/Nefrologia.pre2014.Sep.12468

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Walter, H. H.** Replacement of renal function by dialysis. *Springer*, 2004, 1606 p.

- 2 **Daugirdas Dzhan T., Bleyk Piter Dzh., Todd S.** Guidance on dialysis. Ing; per. s angl. A.Yu. Denisova, V.Yu. Shilo. Moscow: Tsentr Dializa, 2003.
- 3 **Rose, B. D.** Clinical physiology of acid–base and electrolyte disorders. *Medical Pub. Division*. New York.: McGraw-Hill, 2001.
- 4 **Stetsyuk, E. A.** Fundamentals of hemodialysis. Moscow: Izdatelskiy dom GEOTAR-MED, 2001, 392 p.
- 5 **Nikolaev, D. V. , Smirnov, A. V., Bobrinskaya, I. G., Rudnev, S. G.** Bioimpedance analysis of the composition of the human body. Moscow: Nauka, 2009, 392 p.
- 6 **Martinsen, O. G. Orjan, G., Grimnes, S.** Gravimetric Method for in Vitro Calibration of Skin Hydration Measurements. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions*. 2008, 728-732, doi: 10.1109/TBME.2007.912651.
- 7 **Omarov, I., Malyshev, V. D., Vedenina, H. T. et al.** Intensive care. Ed. Prof. Moscow: Medicine, 2002, 584 p.
- 8 **Sokol, E. I., Tomashevskiy, R. S., Tkachuk, B. V.** Hardware control the degree of hydration of the patient during hemodialysis. *Vestnik yuzhnoukrainskogo natsionalnogo universiteta im. V.I. Dolya*. Lugansk, 2012, **18**(189), 227-233.
- 9 **Grimnes, S., Martinsen, Ø. G.** Bioimpedance and electricity basics. *Academic Press*, 2000, 471 p.
- 10 **Jaffrin, M. Y., Morel, H.** Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods. *Med. Eng. Phys.* 2008, **30**(10), 1257-69, doi: 10.1016/j.medengphy.2008.06.009.
- 11 **Yuxing Yang, Wang, J., Gang, Yu, Feilong Niu and et.** Design and preliminary evaluation of a portable device for the measurement of bioimpedance spectroscopy. *Physiol. Meas.* 2006, **27**, 1293-1310, doi: 10.1088/0967-3334/27/12/004.
- 12 **Testov, A. L.** Biotechnical system of evaluation of the amount of fluid in the body and the distribution of it in real-time sectors: dis. na soiskanie stepeni kandidata tehn. nauk: 05.11.17, Tomsk, 2004, 133 p.
- 13 **Spiegel, D. M., Bashir, K., Fisch, B.** Bioimpedance resistance ratios for the evaluation of dry weight in hemodialysis. *Clin. Nephrol*, 2000, **53**, 108-114.
- 14 **Castellano Sandra, Palomares Inés, Molina Manuel and et.** Clinical, analytical and bioimpedance characteristics of persistently overhydrated haemodialysis patients. *Nefrologia*. 2014, **34**(6), 716-23, doi: 10.3265/Nefrologia.pre2014.Sep.12468.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Ткачук Богдан Владимирович** – Инженер 1й категории Харьковского областного клинического центра урологии и нефрологии им. В.И. Шаповала; г. Харьков, Украина; e-mail: bog.tkachuk@gmail.com.

**Bogdan Tkachuk**, Engineer of 1 category, *V. I. Shapoval's regional clinical center of urology and nephrology, Kharkiv, UKRAINE*; e-mail: bog.tkachuk@gmail.com

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Ткачук, Б. В.** Автоматизация контроля статуса гидратации пациента во время процедуры гемодиализа / **Б.В. Ткачук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 93-98. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.14.

*Please cite this article as:*

**Tkachuk, B. V.** Automation control status hydration of patients during hemodialysis. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 93-98, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.14.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Ткачук, Б. В.** Автоматизация контролю статусу гідратації пацієнта під час процедури гемодіалізу / **Б. В. Ткачук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 93-98. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.14.

**АНОТАЦІЯ** У даній статті описана проблема оцінки водного статусу пацієнтів на гемодіалізі. Показана важливість набуття пацієнтом стану нормогідратації або «сухої ваги» і небезпеку при її відсутності. Розроблено структуру системи для контролю статусу гідратації, описана функціональна схема і принцип роботи її блоків. Розроблено алгоритм роботи системи, заснований на фізико-біологічних процесах, що відбуваються в організмі пацієнта при ультрафільтрації. Виконано комп'ютерне моделювання, яке підтверджує адекватність розробленого алгоритму.

**Ключові слова:** «суха вага», біоімпеданс, гемодіаліз, гідратація, гіпергідратація, ультрафільтрація.

Поступила (received) 15.06.2016

## ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ КАМΠΑНИ ФОРМУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ ЧЕРЕЗ МУНДШТУК

А. Я. КАРВАЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>, Т. В. ЛАЗАРЄВ<sup>2</sup>, М. В. КОРЖИК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», НТУУ «КПІ», Київ, Україна

<sup>3</sup> Кафедра автоматизації хімічних виробництв, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

\*email: admin@rst.kpi.ua

**АНОТАЦІЯ** Представлено фізичну, математичну та числову моделі процесу формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук. Модель використовує наближення Bingham-Papanastasiou для опису руху вуглецевого композиту. На основі експериментальних досліджень промислового пресового обладнання визначені необхідні початкові та граничні умови процесу. Окрім того, проведена апробація та верифікація моделі, що підтвердили її адекватність та достовірність. Із використанням розробленого способу числового дослідження процесу формування вуглецевих виробів, проаналізовано вплив на якісні показники пресування таких параметрів як: швидкість пресування, потужності нагрівників пресового інструменту, температура маси, що завантажується.

**Ключові слова:** числове моделювання, вуглецеві вироби, екструзія, в'язко-пластичний матеріал, рідина Bingham, вуглецева маса, коксопековий композит.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF LARGE SIZE CARBON PRODUCTS FORMATION PROCESS USING THE EXTRUSION METHOD

A. KARVATSKIY<sup>1\*</sup>, T. LAZARIEV<sup>2</sup>, M. KORZHYK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of chemical, polymer and silicate engineering, NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

<sup>2</sup> Research center "Resource-saving technologies", NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

<sup>3</sup> Department of computer-integrated technologies, chemical and refining industries, NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

**ABSTRACT** Carbon materials can be different depending on their physical properties and spheres of usage. Electrode and carbon products are used in aggregates of ferrous and non-ferrous metallurgy and chemical industry. High requirements are set for their mechanical and thermal hardness, electrical conductivity and chemical inertness. Pressing through the forming matrix (extrusion die) or extrusion is one of the main methods of formation of large size carbon products. Physical, mathematical and numerical models of process of carbon products formation using the extrusion method are performed. The model uses Bingham-Papanastasiou in order to describe the motion of carbon composite. The average process instructions were defined on the basis of experimental researches on pressing equipment. These instructions include pressure, pressing velocity, heaters operation mode, the character of temperature changes in controlled nodes of equipment. Moreover, approbation and verification have been made, what proves accuracy and adequateness. Using the developed method of numerical investigation of carbon products formation, the influence on process quality was analysed based on such criteria: pressing velocity, heaters power, loading mass temperature. The results of numerical investigation determine the capacity of significant influence on pressing process factors due to the change of investigated parameters.

**Keywords:** numerical simulation, carbonaceous materials, extrusion, viscoplastic material, Bingham fluid, carbon mass, coke/pitch composition.

### Вступ

Моделювання складних технологічних процесів вимагає розробки відповідних математичних та числових моделей, а також проведення їх апробації та верифікації. Зазначений підхід дозволяє вирішувати широкий спектр наукових та технологічних задач із відносно невисокими витратами часових та матеріальних ресурсів. Числове моделювання успішно застосовується в багатьох галузях промисловості, зокрема і на виробництві вуглецевих виробів.

Найбільш поширена технологія виготовлення вуглецевої та графітової продукції починається з підготовки наповнювача, а саме з термічного оброблення коксу чи антрациту в обертових печах і електрокальцинаторах. Наступним етапом є змішування зі зв'язувальним, в ролі якого виступають пеки різних марок. Далі, отримана вуглецева маса формується у заготовки методом екструзії через мундштук на спеціалізованому пресовому обладнанні. При необхідності можуть застосовуватися інші способи формування: пресування у форму, віброформування, ізостатичне пресування. Для одержання монолітного виробу заготовки

випалюються при температурі 900–950 °С завдяки теплоті згоряння газу у випалювальних печах. Кінцевим етапом технологічного циклу є графітування у електричних печах Ачесона чи Кастнера, під час якого вироби розігріваються до 2600 °С [1–3].

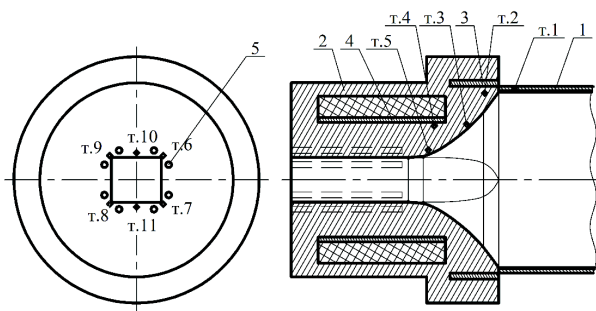
### Ціль роботи

Загальнонауковою проблемою є вдосконалення процесів та обладнання на всіх етапах виробництва вуглецевої продукції, що дозволить підвищити енергоефективність та зменшити техногенний вплив на довкілля. Невирішеною частиною даної проблеми є дослідження процесу формування вуглецевих заготовок та визначення способів розробки нових та вдосконалення вже існуючих регламентів пресування.

Метою цієї статті є створення математичної та числової моделей пресування вуглецевих заготовок, її апробація та верифікація, а також проведення числових досліджень із варіюванням різних технологічних параметрів для визначення їх впливу на показники процесу.

### Виклад основного матеріалу

Промисловий пресовий інструмент для формування великогабаритних вуглецевих заготовок прямокутного перерізу, схематично представлено на рис. 1. Основними конструктивними елементами пресу є масний циліндр; плунжер; мундштук, в якому відбувається процес формування заготовок.



1 – масний циліндр з нагрівником; 2 – мундштук;  
3, 4 – основні нагрівники; 5 – додаткові нагрівники;  
т. 1–11 – точки вимірювання температури

Рис. 1 – Промисловий пресовий інструмент для формування великогабаритних вуглецевих заготовок

Масний циліндр призначений для заповнення масою та являє собою теплоізольовану циліндричну камеру з електричним нагрівником, розташованим по всій його поверхні. Мундштук, або формуюча матриця реалізує дві зони деформування: західну та калібрувальну. В західній частині відбувається значне деформування маси та перехід від круглого до профілю, що відповідає геометрії заготовки, а в калібрувальній частині формується кінцева геометрія виробу. Для створення необхідного рівня температури

поверхні мундштука та маси використовуються два основних нагрівники (в західній та калібрувальній частинах) та декілька додаткових (на виході із мундштука). Режим пресування та температурний режим процесу контролюється сучасною електронно-вимірювальною апаратурою, а регулювання здійснюється автоматично та оператором [4, 5].

Кампанії пресування своєю метою ставить виготовлення певної кількості якісних заготовок, тому після її початку процес змішування та формування пресмаси повторюється через проміжки часу необхідні для заповнення та прогрів масного циліндру й мундштука. Тому формування виробів складається з таких основних операцій на кожному етапі кампанії: підпресовка – операція ущільнення маси; пресування; відрізання заготовки певної довжини; охолодження водою та огляд заготовки; заповнення масного циліндра новою порцією маси; розігрів маси до визначеної температури.

Фізична модель процесу формування вуглецевих заготовок способом екструзії може бути представлена наступним чином.

Циклічний характер процесу пресування дає змогу розглядати лише один його етап, який складається з періоду пресування на якому відбувається формування виробів та періоду простою, коли завантажується нова порція вуглецевої маси і розігрівається пресовий інструмент.

Період формування в продовж підпресовки можна вважати статичним по відношенню до механічної дії, оскільки рух маси не відбувається, а здійснюється лише її ущільнення. З боку зміни теплового стану він є нестационарним, оскільки має місце теплообмін між пресовим інструментом, вуглецевою масою та середовищем. На момент початку формування виробів процес стає динамічним, відбувається екструзія (рух) маси через мундштук та її в'язко-пластична деформування разом зі зміною розподілу температур в об'ємі. Вуглецева композиція вважається неньютонівською нестигливою рідиною, а саме рідиною типу Bingham. Екструзія маси відбувається завдяки переміщенню плунжера в масному циліндрі пресового інструменту. Дискретне відрізання окремих сформованих заготовок та час, що витрачається на технологічні операції можливо представити у вигляді неперервного процесу екструзії з ефективною швидкістю, яка враховуватиме як зупинки, так і загальну витрату маси на етапі.

Під час періоду простою між пресуванням окремих партій заготовок відбувається заповнення масного циліндра новою порцією пресмаси та її часткове ущільнення. Зазначені операції проходять при закритому масивною плитою вихідному отворі мундштука. Період розглядається, як статичний по відношенню до руху маси, а також враховуються втрати теплоти через контакт з плитою.

Нагрівання маси та частин пресового обладнання здійснюється за рахунок основних та додаткових електричних нагрівників, що розташовані

в різних частинах обладнання. Регулювання інтенсивності нагріву та рівня температури відбувається зміною електричних параметрів нагрівників за показаннями датчиків температури, що встановлені в тілі пресового інструменту. Охолодження заготовки після екструзії здійснюється зрошенням її водою.

Розглянуті етапи екструзії заготовок відбуваються згідно регламенту пресування, що визначає швидкість та тиск пресування, а також характер зміни та рівень температури в різних частинах мундштука.

Математична модель процесу формування вуглецевої маси через мундштук може бути представлена нестационарною нелінійною системою рівнянь, що включає рівняння нерозривності, руху та енергії [6] для ламінарного потоку нестисливої ідеальної рідини Bingham (1) для пресмаси та рівняння енергії з внутрішнім джерелом теплоти для елементів пресового інструменту (2). В системі рівнянь задаються теплові параметри та характер їх зміни, швидкість пресування, а також зміна електричних параметрів нагрівників.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}; \\ \rho \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\boldsymbol{\tau}} : \nabla \mathbf{v}, \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + q_v, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $\mathbf{v}$  – вектор швидкості, м/с;  $\nabla$  – оператор Гамільтона, м<sup>-1</sup>;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – час, с;  $p$  – тиск, Па;  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$  – тензор зсувних напружень, відповідно до моделі Bingham, Па;  $h = \int_0^T c_p(T) dT$  – масова ентальпія, Дж/кг;  $T$  – абсолютна температура, К;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);  $\lambda_{eff}$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $\bar{\boldsymbol{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$  – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м<sup>3</sup>;  $(\cdot)$  – оператор подвійного скалярного добутку;  $q_v$  – об'ємна густина джерел теплоти, що пов'язана із джоулевою теплою, Вт/м<sup>3</sup>.

Ідеальна рідина Bingham є ньютонівською в'язко-пластичною рідиною [4, 5], під час течії якої в'язкість залежить від градієнта швидкості. В'язко-пластична рідина вирізняється тим, що вона до досягнення деякого критичного внутрішнього напруження (статичне напруження зсуву)  $\tau_{shear}$  веде себе як тверде тіло і тільки при перевищенні внутрішнього напруження вище за критичну величину починає рухатися як звичайна рідина. Причиною такого явища є те, що в'язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру,

що чинить опір будь-яким внутрішнім напруженням меншим за критичну величину.

Тензор зсувних напружень за моделлю Bingham записується у вигляді [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\boldsymbol{\tau}} = \left( \mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} \right) \dot{\boldsymbol{\gamma}}, \quad |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{shear}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, \quad |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{shear}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $\mu_{eff}$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  $\tau_{shear}$  – статичне напруження зсуву матеріалу, Па;

$|\dot{\boldsymbol{\gamma}}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\boldsymbol{\gamma}} : \dot{\boldsymbol{\gamma}})}$  – другий інваріант від  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ , с<sup>-1</sup>;  $\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$  – швидкість деформації, с<sup>-1</sup>;

$|\boldsymbol{\tau}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\boldsymbol{\tau}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\boldsymbol{\tau}} : \bar{\boldsymbol{\tau}})}$  – другий інваріант від  $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ , Па.

Регуляризацію моделі Bingham за допомогою введення експоненціального множника, запропоновано в роботах Papanastasiou [7]:

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \left( \mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} [1 - \exp(-m|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|)] \right) \dot{\boldsymbol{\gamma}}, \quad (4)$$

де  $m$  – експоненціальний множник, с.

Для в'язко-пластичної вуглецевої маси використано значення експоненціального множника  $m = 100$ .

За початкові умови системи рівнянь (1), (2) прийнято розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску й температури:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{array} \right. \quad (5)$$

де  $(x, y, z)$  – декартові координати, м.

Для врахування різних періодів процесу пресування застосовуються динамічні граничні умови (6)–(8). Дані граничні умови відображають зміни вхідних параметрів системи під час підпресування матеріалу, пресуванні окремих заготовок і простою для технологічних операцій, а також зміна режиму роботи нагрівальних елементів пресового інструменту.

Для маси, що рухається у внутрішньому просторі мундштука, задаються: у вхідному перерізі – нормальна швидкість і температура (6); у вихідному перерізі – нульовий градієнт тиску і температури (7); на поверхні контакту маса-елементи пресового інструменту – умови проковзування і умови абсолютного теплового контакту (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{wall} = 0; \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де  $\mathbf{n}$  – зовнішня нормаль до вхідного чи вихідного перерізу;  $\bar{\tau}_{wall}$  – тензор зсувних напружень на границі контакту маса–тверде тіло, Па;  $\{T\} = T^+ - T^-$ ;  $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^-$ .

Для елементів пресового інструмента задаються: умови теплообміну з оточуючим середовищем, умови абсолютного теплового контакту та внутрішнє джерело теплоти

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha_{eff}(T - T_\infty); \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ q_v = q(t), \end{cases} \quad (9)$$

де  $T_\infty$  – температура оточуючого середовища, К;  $\alpha_{eff}$  – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $q_v$  – внутрішнє джерело теплоти, що вноситься електричними нагрівниками, Вт/м<sup>3</sup>.

Для числової реалізації представленої математичної моделі (1)–(9) застосовано метод скінчених об'ємів. Дискредитована симетрична модель пресового інструменту представлена на рис. 2, яка складається з 385788 різнотипних елементів. Розв'язання рівняння системи (1) для вуглецевої маси виконується за допомогою алгоритму неявного зв'язку між тиском та швидкістю – SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [6]. Числова модель реалізована на основі вільного відкритого програмний коду OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) [8].

Числові дослідження процесу формування вуглецевої продукції проведені з використанням експериментальних даних, що отримані на промисловому пресі для виготовлення великогабаритних прямокутних заготовок [9]. Маса для формування заготовок має наступний склад: зв'язувальне (кам'яновугільний пек) – 27,6±2 %; наповнювач: графітована вуглецева сировина фракції 0–10 мм – 70 %; графітована вуглецева сировина фракції 0–0,05 мм – 30 %.

Кампанія проведена за таких параметрів:

- тиск підпресовки 20,4–20,8 МПа, тиск пресування заготовок – 2,1–2,6 МПа;
- швидкість пресування заготовок 0,7–1,0 м/хв;
- потужність нагрівника масного циліндра 22 кВт;
- потужність нагрівника західної частини мундштука 32–34 кВт;
- потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука 44–47 кВт;
- потужність додаткових нагрівників 1,8 кВт, система автоматики підтримує сталий рівень

температури в діапазоні 115–120 °С за показами точок 6–9.

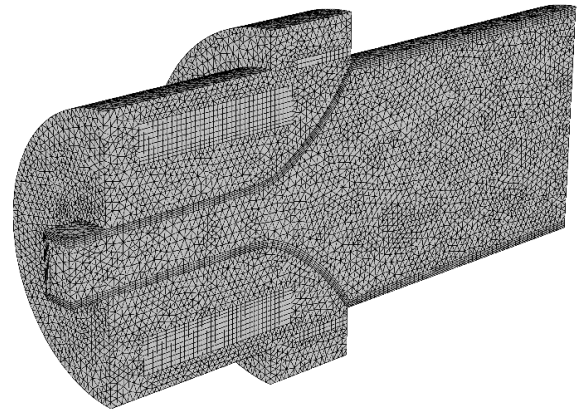


Рис. 2 – Дискредитована модель пресового інструменту для формування великогабаритних вуглецевих заготовок

Режим роботи пресового обладнання та нагрівників у безрозмірній за часом формі представлено на рис. 3, 4. Сірим кольором виділено час пресування заготовок.

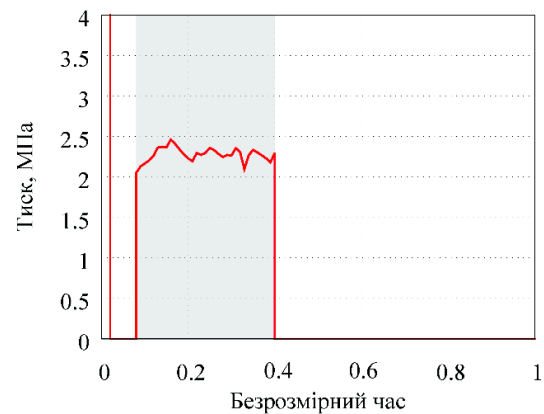


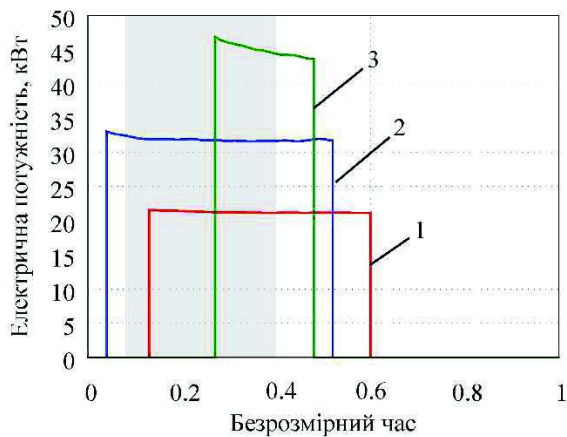
Рис. 3 – Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, тиск пресування

Наведений регламент використано як граничні умови для числового моделювання.

Співставлення результатів розрахунків та експериментальних даних по точках вимірювання температури наведено на рис. 5.

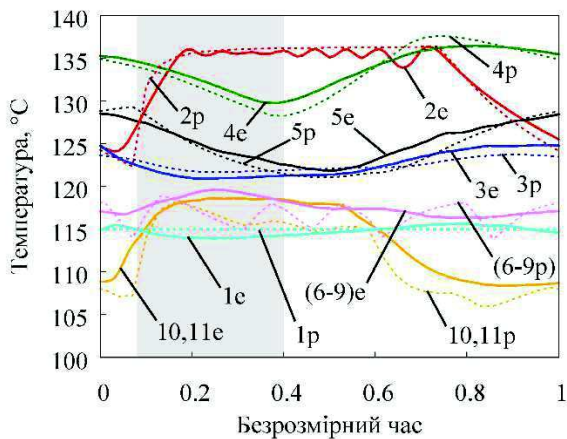
Результати порівняння показують збіжність, а різниця не перевищує 4–6 %.

За інформацією, по проведеній за представленим регламентом кампанії пресування великогабаритних заготовок прямокутного перерізу, не виявлено бракованої продукції, що свідчить про його ефективність. Тому на підставі експериментальних та розрахункових даних можливо зробити висновок про фактори проведення безбракових кампаній формування.



1 – потужність нагрівника масного циліндра;  
2 – потужність нагрівника західної частини мундштука;  
3 – потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука

Рис. 4 – Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, електрична потужність



Т. 1–11 – точки вимірювання температури; е – осереднене експериментально визначене значення температури; р – температура, що отримана в результаті моделювання

Рис. 5 – Співставлення результатів розрахунків та експериментальних даних по точках вимірювання температури для кампанії пресування

Для існуючого в умовах реального виробництва рівня швидкості руху матеріалу через мундштук, коксопекова маса поводить як структурована в'язко-пластична рідина, що характеризується наявністю уздовж стінок внутрішньої поверхні мундштука суцільного тонкого ламінарного шару рідини і псевдо твердого тіла в основному потоці. В такому випадку визначальну роль в нерозривності середовища відіграє наявність вище зазначеного тонкого ламінарного шару, який забезпечує умови проковзування основного потоку по внутрішній поверхні мундштука. З фізичної точки зору роль мастила на поверхні контакту виконує кам'яновугільний пек, який під дією тиску та

нагрівання вище температури розм'якшення дифундує на периферію потоку матеріалу [10].

Температурний діапазон, що забезпечує необхідні умови проковзування для вуглецевого композиту становить 110–150 °С. З іншого боку, необхідною умовою структурного режиму течії є наявність твердого та пластичного ядра потоку, що є можливим за температур вуглецевої маси нижче 110 °С [11].

Дані експериментальних досліджень та результати числового моделювання дають змогу визначити характеристики температурного поля вихідної частини мундштука, необхідного для одержання бездефектних виробів.

Характеристична величина  $A$  є співвідношенням площі поверхні маси, яка має температури нижче ніж 110 °С до загальної площі перерізу вихідної частини мундштука

$$A = \frac{S_{110^{\circ}C}}{S}, \quad (10)$$

де  $S_{110^{\circ}C}$  – площа поверхні перерізу мундштука, що має температуру нижче ніж 110 °С;  $S$  – загальна площа перерізу мундштука.

Зазначена величина розраховується для початкової ( $A_1$ ) та кінцевої ( $A_2$ ) ділянок калібрувальної частини мундштука і повинна знаходитись у діапазоні 0,2–0,55 під час процесу формування. Саме такі умови характеризують достатній поверхневий шар матеріалу з температурою 110–150 °С та наявне ядро потоку з температурою нижче 110 °С.

Методи числового аналізу дають змогу виконати оцінку впливу на тепловий стан та показники процесу формування вуглецевих заготовок таких основних параметрів:

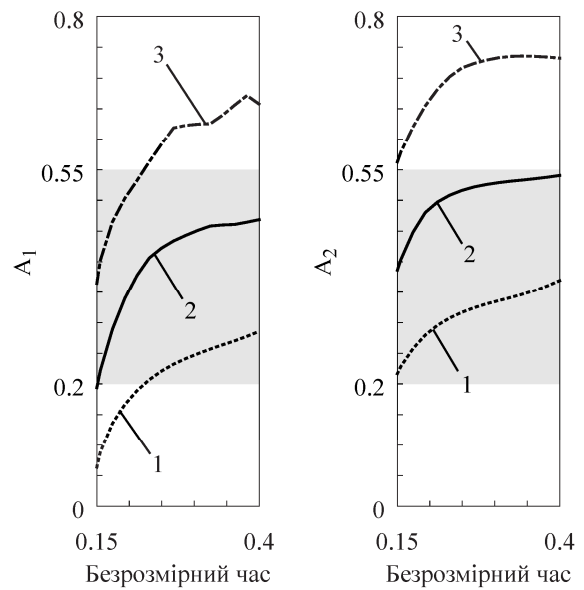
- швидкість пресування ( $v$ );
- потужність нагрівника масного циліндра ( $Q_{\text{масн.цил.}}$ );
- потужність нагрівника західної частини мундштука ( $Q_{\text{зах.}}$ );
- потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука ( $Q_{\text{калібр.}}$ );
- температура маси, що завантажується ( $T_{\text{мас.}}$ );

Проведена серія числових розрахунків із варіюванням окремих параметрів при незмінному значенні всіх інших величин та режиму роботи пресового інструменту. Значення параметрів, що використані для числових досліджень приведено в табл. 1. Їх вплив на перебіг процесу формування заготовок оцінено за зміною величин  $A_1$  та  $A_2$  (рис. 6–10) в порівнянні із базовою (експериментальною) (крива 2) кампанією на періоді пресування.

Найбільш суттєво на температурне поле вуглецевої маси, що пресується, впливає зміна швидкості пресування, потужності нагрівника масного циліндра та температури маси, що завантажується. Дещо менший вплив має нагрівник

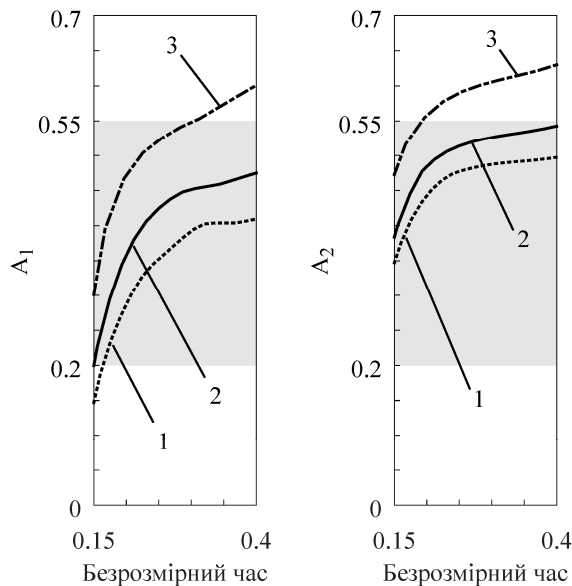
Таблиця 1 – Параметри числових досліджень процесу формування вуглецевих виробів

| Параметр  | Значення параметрів для базового варіанту | Варіаційне значення параметрів |      |
|---|---|--------------------------------|------|
|   |   |                                |      |
| Швидкість пресування заготовок, м/хв                        | 0,68                                      | 0,34                           | 0,95 |
| Потужність нагрівника масного циліндра, кВт                 | 22  | 20                             | 24   |
| Потужність нагрівника західної частини мундштука, кВт       | 33  | 30,6                           | 35,4 |
| Потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука, кВт | 46  | 40,6                           | 51,4 |
| Температура маси, що завантажується, °С                     | 97  | 90                             |      |



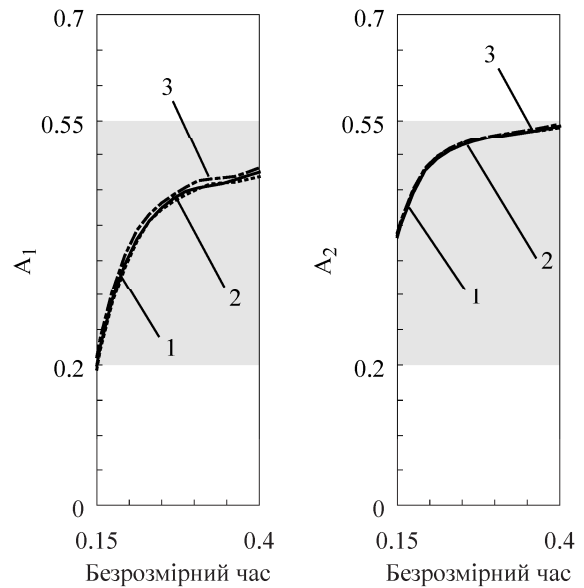
$a - A_1; b - A_2; 1 - Q_{\text{масн. цил.}} = 20 \text{ кВт};$   
 $2 - Q_{\text{масн. цил.}} = 22 \text{ кВт}; 3 - Q_{\text{масн. цил.}} = 24 \text{ кВт}$

Рис. 7 – Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника масного циліндра



$a - A_1; b - A_2; 1 - v = 0,34 \text{ м/хв}; 2 - v = 0,68 \text{ м/хв};$   
 $3 - v = 0,95 \text{ м/хв}$

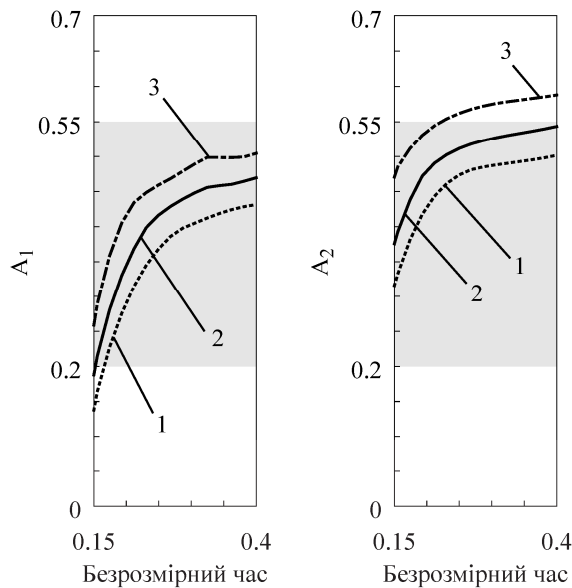
Рис. 6 – Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни швидкості пресування заготовок



$a - A_1; b - A_2; 1 - Q_{\text{зах.}} = 30,6 \text{ кВт}; 2 - Q_{\text{зах.}} = 33 \text{ кВт};$   
 $3 - Q_{\text{зах.}} = 35,4 \text{ кВт}$

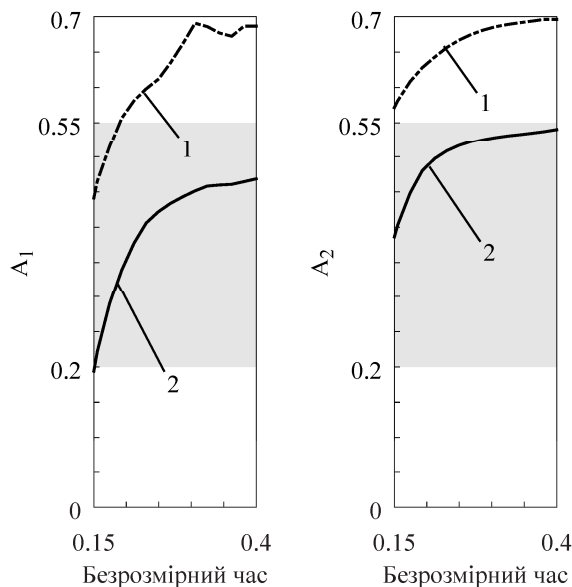
Рис. 8 – Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника західної частини мундштука





$a - A_1$ ;  $b - A_2$ ; 1 –  $Q_{\text{калібр.}} = 40,6 \text{ кВт}$ ;  
2 –  $Q_{\text{калібр.}} = 46 \text{ кВт}$ ; 3 –  $Q_{\text{калібр.}} = 51,4 \text{ кВт}$

Рис. 9 – Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника калібрувальної частини мундштука



$a - A_1$ ;  $b - A_2$ ; 1 –  $T_{\text{мас.}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{мас.}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 10 – Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни температури маси, що завантажуються

калібрувальної частини мундштука, а нагрівник західної частини мундштука практично не змінює температурне поле на виході із пресового інструменту.

## Висновки

Представлені результати числового експерименту вказують на можливість значно впливати на показники процесу пресування, зміною майже всіх розглянутих параметрів. Проте наведені варіаційні значення параметрів призводять до зміни показників процесу, що виходять за допустимий діапазон, характерний для безбракової кампанії пресування. Результати підтверджують раціональність регламенту формування розглядуваних вуглецевих виробів, який застосовується на виробництві.

Отримані дані дозволяють прогнозувати та змінювати процес формування великогабаритних вуглецевих заготовок, при зміні характеристик пресмаси чи інших технічних умов.

## Список літератури

- 1 Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology / ed. ed by Arza Seidel. – Wiley. – 2004. – Vol. 4. – 872 p.
- 2 Jäger, H. Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry / H. Jäger, W. Frohs, M. Banek, et. all. – Wiley. – 2010. – 40 p. – doi: 10.1002/14356007.n05\_n03.
- 3 Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production / ed. by A. Tomsett, J. Johnson. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2013. – Vol. 4. – 1210 p. – doi: 10.1002/9781118647745.
- 4 Фялков, А. С. Процессы и аппараты производства порошковых углеродистых материалов / А. С. Фялков. – М.: Аспект Пресс. – 2008. – 687 с.
- 5 Лазарев, Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 6 Карвацкий, А. Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів / А. Я. Карвацкий, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – 352 с.
- 7 Mitsoulis E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations / E. Mitsoulis // Rheology Reviews. – 2007. – 2007. – P. 135-178.
- 8 OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.openfoam.org/> – 01.08.2016 p.
- 9 Карвацкий, А. Я. Экспериментальное исследование теплового состояния промышленного прессы для формирования углеродной продукции / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2016. – № 3 (237). – С. 188-194.
- 10 Händle, F. Extrusion in ceramics / ed. by F. Händle. – Springer. – 2007. – 470 p. – doi: 0.1007/978-3-540-27102-4.
- 11 Карвацкий, А. Я. Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 °C / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко // Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологиях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.18.11.

## Bibliography (transliterated)

- 1 Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Wiley, 2004, 4, 872 p.
- 2 Jäger, H., Frohs, W., Banek, M., et. all. Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley, 2010, 40 p., doi: 10.1002/14356007.n05\_n03
- 3 Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 4, 1210 p., doi: 10.1002/9781118647745.
- 4 Fialkov, A. S. Processy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov. Moscow: Aspekt Press, 2008, 687 p.
- 5 Lazarev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenko, A. The mathematical model of extrusion of viscoplastic carbon composition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, 12, 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 6 Karvatskii, A. Ja., Panov, Je. M., Kutuzov, S. V. et. all. Teoretychni ta eksperymental'ni doslidzhennja teploelektrychnogo ta mehanichnogo stanu vysokotemperaturnykh agregativ, Kyiv: NTUU «KPI», 2012, 352 p.
- 7 Mitsoulis, E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations. *Rheology Reviews* 2007, 2007, 135-178.
- 8 OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. <http://www.openfoam.org/>
- 9 Karvatskii, A., Lazarev, T., Pedchenko, A. Experimental investigation of the thermal state of industrial press for carbon products forming. *Herald of khmelnytskyi national university: Technical sciences*, 2016, 3, 188-194.
- 10 Händle, F. Extrusion in ceramics. Springer, 2007, 470 p., doi: 0.1007/978-3-540-27102-4.
- 11 Karvatskii, A., Lazarev, T., Shvachko, D., Tyshchenko, O. Rheological properties of carbon composition within temperature rang 120–170 °C. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2016, 46, 74-79, doi: 10.20998/2413-4295.2016.18.11.

## Відомості про авторів (About authors)

**Карвацький Антон Янович** – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

**Anton Karvatskii** – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, Senior Researcher, Professor, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

**Лазарєв Тарас Валерійович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: t\_lazarev@rst.kpi.ua.

**Taras Lazarev** – Candidate of Sciences (Ph. D.), Researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: t\_lazarev@rst.kpi.ua.

**Коржик Михайло Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: korzhyk@rst.kiev.ua.

**Mykhailo Korzhyk** – Candidate of Sciences (Ph. D.), associate professor, Department of computer-integrated technologies, chemical and refining industries, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: korzhyk@rst.kiev.ua.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Карвацький, А. Я.** Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, М. В. Коржик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 99-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

*Please cite this article as:*

**Karvatskii, A., Lazarev, T., Korzhyk, M.** Numerical investigation of large size carbon products formation process using the extrusion method. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 25 (1197), 99-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Карвацький, А. Я.** Численные исследования кампании формирования крупногабаритных углеродных изделий методом экструзии через мундштук / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарєв, М. В. Коржик** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 99-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

**АННОТАЦІЯ** Представлено фізическую, математическую и численную модели процесса формирования крупногабаритных углеродных изделий методом экструзии через мундштук. Модель использует приближения Bingham-Papanastasiou для описания движения углепекowego композита. На основе экспериментальных исследований промышленного прессового оборудования определены необходимые начальные и граничные условия процесса. Кроме того, проведена апробация и верификация модели, что подтвердило её адекватность и достоверность. С использованием разработанного способа численного исследования процесса формирования углеродных изделий, проанализировано влияние на качественные показатели прессования таких параметров как: скорость прессования, мощности нагревателей прессового инструмента, температура загружаемой массы.

**Ключевые слова:** численное моделирование, углеродные изделия, экструзия, вязко-пластичный материал, жидкость Bingham, углеродная масса, коксопексовая смесь.

Поступила (received) 24.06.2016

УДК 621.039.58

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.16

## КОНТРОЛЬ ОСНОВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ГОЛОВНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО НАСОСА АТОМНОЇ СТАНЦІЇ

**С. О. КУЧЕР**

*Відділ міцності судів і насосів ядерної установки, Експертно-технічний центр «Енергоресурс», м. Київ, УКРАЇНА  
email: kucher0972@ukr.net*

**АНОТАЦІЯ** Стаття присвячена контролю основних властивостей металу головного циркуляційного насоса, який необхідний для оцінки технічного стану насосного обладнання реакторного відділення атомної електростанції при розгляді питань з періодичної переоцінки безпеки його експлуатації. Проведення контролю дозволить проаналізувати механізми старіння з подальшим виявленням ефектів старіння для кожного елемента конструкції насоса і повне розуміння їх можливих наслідків. Крім того контроль сприяє визначенню відповідності між фактичним старінням конструкції насоса і прогнозованим, а також перевірці запасу щодо старіння для забезпечення безпечної експлуатації, як мінімум на період до наступної періодичної переоцінки безпеки.

**Ключові слова:** головний циркуляційний насос, технічний стан, оцінка безпеки, твердість металу, товщинометрія

## CONTROL THE BASIC PROPERTIES OF THE METAL OF THE MAIN CIRCULATION PUMP NUCLEAR POWER STATION

**S. KUCHER**

*Department of strength of vessels and pumps of a nuclear facility, LLC "Expert-technical center "EnergyResource", Kiev, UKRAINE*

**ABSTRACT** The article is devoted to solving scientific and technical tasks – analysis of control of basic properties of the metal of the main circulation pump. The control of the basic properties of the metal of the main circulation pump is necessary for the evaluation of the technical condition of the pumping equipment of the reactor compartment of a nuclear power plant, when considering the questions on periodic reevaluation of safety of its operation. Holding control will allow you to perform the aging mechanisms followed by identification of all aging effects for each structural element of the pump and a full understanding of their possible consequences. Additionally, the control contributes to the determination of conformity between the actual aging of the pump construction and projected, as well as stock check on aging to ensure safe operation, at least for the period until the next periodic reevaluation of safety. The measurements and their analysis of the main properties of the metal of the main circulation pump will allow you to identify or expand technical parameters that determine the processes of degradation of equipment to further justify the method of assessing their current technical condition and residual life, taking into account the requirements of safe operation of nuclear power plants.

**Keywords:** the main circulation pump, technical condition, safety evaluation, the hardness of the metal, thickness measurement

### Вступ

На атомних електростанціях (АЕС) України з метою підтримання у прийнятних межах деградації конструкцій та обладнання систем і елементів, важливих для безпеки (внаслідок старіння, зносу, корозії, втоми та інш.), а також здійснення необхідних дій для підтримання їх працездатності та надійності в процесі експлуатації, проводиться періодична переоцінка її безпечної експлуатації [1-3]. У першу чергу це стосується обладнання, яке вже відпрацювало проектний термін експлуатації і може отримати дозвіл на продовження термінів подальшої експлуатації. До цього обладнання відноситься головний циркуляційний насос (ГЦН) типу ГЦН-195М, призначений для створення циркуляції теплоносія в першому контурі реакторної установки (РУ) та для відведення тепла з активної зони реактора. Метою аналізу старіння в рамках періодичної переоцінки безпеки є: виявлення всіх ефектів старіння для кожного елемента конструкції насоса та повне розуміння їх можливих наслідків; визначення

відповідності між фактичним старінням конструкції насоса і прогнозованим; перевірка запасу щодо старіння для забезпечення безпечної експлуатації на період до наступної періодичної переоцінки безпеки. Старіння насоса, який відпрацював проектний термін служби [4], в першу чергу залежить від стану металу конструкцій і елементів насоса, ступеня його механічного та ерозійно-корозійного зносу [5]. Запаси міцності, закладені в конструкцію ГЦН, дозволяють продовжити подальшу безпечну експлуатацію насосів [7]. Але для цього крім звичайних методів огляду, які передбачені інструкціями експлуатації насосів і трубопроводів, повинні бути розроблені відповідні комплексні методики технічного діагностування. Методологія визначення чисельних значень технічних параметрів, що характеризують механізм накопичення незворотних змін в складових частинах ГЦН (наприклад, методологія виконання розрахунків циклічної міцності або методологія контролю основних властивостей металу) на сьогоднішній день повною мірою не вирішена. Відсутні також є вимоги до методів і систем вимірювання (визначення)

© С. О. КУЧЕР, 2016

параметрів, які характеризують деградаційні властивості ГЦН в цілому.

### Мета роботи

Основою для розробки методології з контролю основних властивостей металу ГЦН є накопичений автором досвід виконання робіт, спрямованих на продовження строку експлуатації і управління старінням тепломеханічного обладнання (ТМО) АЕС в цілому, та ГЦН зокрема. Проведені на енергоблоках Південно-Української (ПУ) АЕС дослідження ставили за мету подальше наукове обґрунтування методів оцінки технічного стану та залишкового ресурсу ГЦН (особливо його невідновлюваного елемента - "равлика", рис.1), враховуючи процеси його деградації для періодичної переоцінки безпечної експлуатації насосів.



Рис. 1 – Модель корпусу равлика ГЦН

### Виклад основного матеріалу

Властивості металу ГЦН характеризуються насамперед характеристиками міцності конструкцій насоса [8]. Визначення фактичних характеристик міцності металевих конструкцій можливо методом виміру твердості. Зв'язок між міцністю металу і його твердістю досить відомо, а співвідношення між цими параметрами сталей зазначено в ГОСТ 22761-77 «Метод вимірювання твердості за Брінеллем переносними твердомірами статичної дії» [9]. Є велика кількість приладів неруйнівного методу контролю твердості, що дозволяють виконувати вимірювання у важкодоступних місцях. На ПУ АЕС було використано портативний твердомір ТМ-40 - легкий, малогабаритний, оснащений усіма необхідними функціями, прилад з високою продуктивністю і простотою проведення вимірювань, а також високим ступенем пиловологозахисту (IP54). Основні методи, застосовувані у приладі — це ультразвуковою і динамічний. У динамічному методі визначається непряма характеристика — відношення швидкості при ударі і відскоку індентора. В

ультразвуковому методі вимірюваним параметром є частота коливань індентора, при його впровадженні в зразок на певну глибину під дією постійного зусилля. Значення непрямих характеристик надалі переводяться в число твердості. Так як деякі дефекти практично неможливо виявити ультразвуковим методом у силу їх характеру, форми або розташування на об'єкті контролю, при проведенні вимірювань був використаний динамічний метод, що дозволяє враховувати складність конструкції, наявність виступаючих частин, наявність різних типів з'єднань – різбових, шпонкових, шліцевих, присутніх у конструкції насоса. Вимірювання твердості металу проводилося в районі зварних з'єднань з обох боків зварного шва в наступних зонах: зварний шов; околошовна зона - на відстані до 20 мм від краю зварного шва; основний метал - на відстані від 20 до 50 мм від краю шва. Вимірювання твердості здійснювалося безпосередньо на поверхні конструкції насоса, на шліфованому плоскому майданчику. Обробка поверхні при застосуванні ТМ-40 є обов'язковою умовою, а від якості її виконання багато в чому може залежати точність результату вимірювання. Для реалізації експерименту, поверхня зразків була оброблена декількома різними способами: зачистка від фарбувального шару; зачистка від шару окалини; шліфування поверхні шліфувальними кругами різної зернистості. Було виявлено, що зернистість шліфувальних кругів (від Z-40 до Z-120) практично не впливає на дисперсію значень. Коефіцієнт варіації при обробці склав 3,7...5,1 %. При цьому шорсткість обробленої поверхні, за даними аналізу, склала 0,35...1,79 мкм, що є допустимим для застосування динамічного методу. В процесі проведення вимірювань також було встановлено, що близькість ділянки вимірювання до зварного шва чинить значний вплив на похибку вимірювань, а підвищена твердість у зоні зварного шва зберігається в зоні, яка приблизно дорівнює трьом розмірам шва по ширині. Твердість металу визначалася як середнє арифметичне значення з трьох вимірювань в одному і тому ж місці. При цьому відносна похибка кожного вимірювання не перевищувала 4%. Схема зон контролю твердості металу показана на рис.2

У відповідності з проведенням контролю стану металу елементів ГЦН було виконано також вимірювання товщини основного металу ультразвуковим методом. Ультразвукова товщинометрія (УЗТ) проводилася з допомогою товщиноміра УТ-31. У приладі використовується контактний спосіб забезпечення акустичного контакту притиском контактної поверхні перетворювача до поверхні контрольованого об'єкта, на яку нанесена контактна змазка. Товщинометрія була виконана в обсязі, передбаченому нормативними документами [10]. На поточний момент у галузі відсутні затверджені до застосування нормативні документи (НД), що дозволяють розраховувати

швидкість утонення і тривалість експлуатації обладнання на основі даних експлуатаційного контролю. Це стримує використання вже розроблених документів з розрахунку мінімально допустимих товщин стінок конструкцій, методик проведення експлуатаційного контролю.

Контроль товщини стінок конструкцій насосу, оцінки якості поверхні елементів ГЦН також був проведений з метою оцінки його технічного стану з подальшим визначенням можливості продовження його терміну експлуатації. Необхідність проведення вимірювань зумовлена недостатністю даних для підтвердження параметрів технічного стану та встановлення причин деградації ГЦН в цілому. Вибір контрольних елементів ГЦН для проведення вимірювання товщини визначався наявністю: зварних з'єднань елементів конструкції ГЦН; зварних з'єднань ГЦН з іншими елементами енергоблоку; зон з концентрацією напружень у конструкції ГЦН; дефектів в т. ч. - утоненій, допущених в період експлуатації; найбільш навантажених ділянок; ділянок, схильних до вібраційних навантажень.

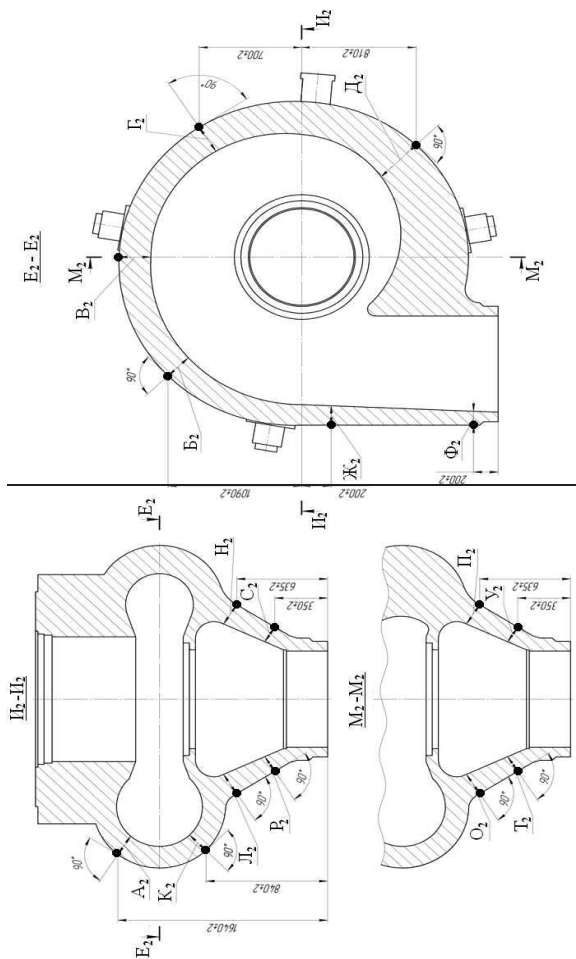


Рис. 2 – Схема зон контролю твердості металу ГЦН. Основний метал корпусу равлика насоса з боку зовнішньої поверхні

Схема зон контролю товщини металу насоса показана на рис.3. Вимірювання товщини стінок проведено в районі зварних з'єднань №1 і №2 приварки перехідників до всмоктуючих і напірних патрубків. Номінальна товщина зварювальних деталей в місці зварювання 100 мм (у зонах контролю). Мінімальна розрахункова товщина стінки перехідників 43 мм.

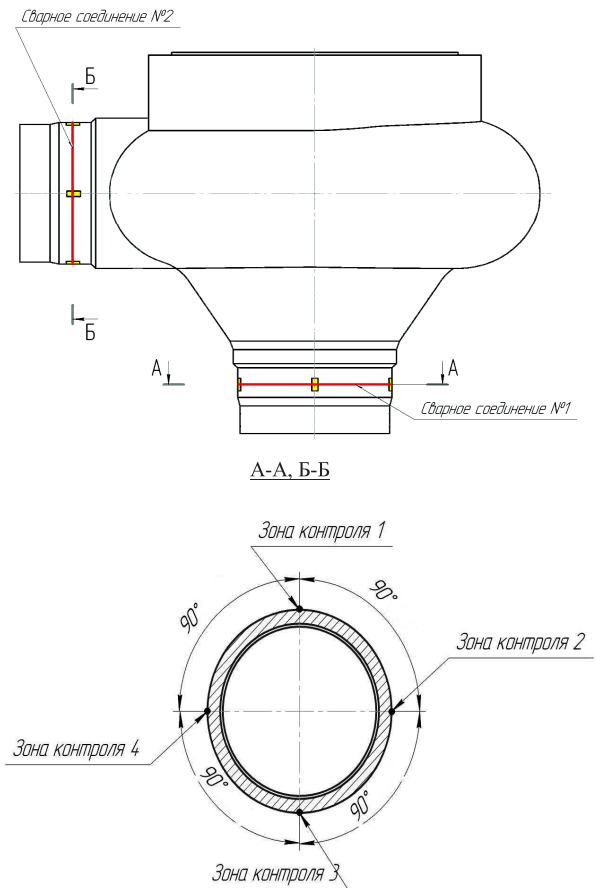


Рис. 3 – Схема зон контролю товщини металу ГЦН

### Чисельні результати

Перевага запропонованої методології з контролю основних властивостей металу ГЦН при розгляданні питань оцінки технічного стану та продовження ресурсу обладнання полягає насамперед у чіткості та однозначності обраних напрямків виконання даних робіт.

Визначення твердості металу на обстежуваних елементах і конструкціях насоса було виконано з метою перевірки відповідності механічних характеристик значенням, встановленим нормативною документацією та технічною документацією на насос, і виявлення окремих ділянок з незадовільними значеннями.

Характеристики механічних властивостей металу елементів ГЦН у відповідності з вимірними

значеннями твердості за Брінеллем визначалися за кореляційним співвідношенням у відповідності з положеннями сучасних методик, у тому числі [11].

Таблиця 1 – Результати контролю твердості металу ГЦН

| N              | Вимірювання твердості, НВ |     |     |
|----------------|---------------------------|-----|-----|
|                | №1                        | №2  | №3  |
| A <sub>2</sub> | 261                       | 252 | 253 |
| B <sub>2</sub> | 251                       | 249 | 260 |
| B <sub>2</sub> | 238                       | 233 | 244 |
| G <sub>2</sub> | 241                       | 236 | 232 |
| D <sub>2</sub> | 215                       | 219 | 221 |
| Ж <sub>2</sub> | 217                       | 222 | 217 |
| K <sub>2</sub> | 228                       | 230 | 235 |
| L <sub>2</sub> | 223                       | 226 | 218 |
| H <sub>2</sub> | 241                       | 239 | 240 |
| O <sub>2</sub> | 228                       | 231 | 225 |

|                |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|
| P <sub>2</sub> | 224 | 222 | 229 |
| P <sub>2</sub> | 226 | 227 | 223 |
| C <sub>2</sub> | 248 | 243 | 239 |
| T <sub>2</sub> | 241 | 250 | 248 |
| У <sub>2</sub> | 250 | 244 | 252 |
| Ф <sub>2</sub> | 247 | 254 | 245 |

При обробці результатів контролю механічних властивостей по твердості металу повинно бути встановлено відповідність значень механічних властивостей металу ГЦН вимогам НД, а також – наявність і закономірності їх зміни в процесі експлуатації. При цьому, зміна (зменшення та/або збільшення) отриманих механічних властивостей порівняно з паспортними або отриманими раніше, на значення більше, ніж похибка їх визначення, оцінюється як необхідність урахування цього факту при перепризначенні терміну експлуатації ГЦН.

Таблиця 2 – Результати контролю товщин стінок металу ГЦН

| № п/п | Найменування контрольованого елемента | Зона контролю    | Найменше виміряне значення товщини, мм |       |            |       |
|-------|---------------------------------------|------------------|--|-------|------------|-------|
|       |                                       |                  | патрубок                               |       | перехідник |       |
|       |                                       |                  | ОМ                                     | ОЗ    | ОЗ         | ОМ    |
| 1     | Зварне з'єднання №1                   | №1 (0-00 годин)  | 99,0                                   | 100,6 | 98,6       | 100,8 |
|       |                                       | №2 (3-00 години) | 100,5                                  | 100,7 | 99,2       | 99,0  |
|       |                                       | №3 (6-00 годин)  | 100,7                                  | 100,5 | 98,7       | 98,8  |
|       |                                       | №4 (9-00 годин)  | 100,9                                  | 100,4 | 98,8       | 98,7  |
| 2     | Зварне з'єднання №2                   | №1 (0-00 годин)  | 99,4                                   | 99,5  | 98,9       | 100,8 |
|       |                                       | №2 (3-00 години) | 100,3                                  | 100,4 | 99,7       | 100,7 |
|       |                                       | №3 (6-00 годин)  | 100,5                                  | 100,7 | 100,2      | 100,9 |
|       |                                       | №4 (9-00 годин)  | 99,5                                   | 98,9  | 99,4       | 100,8 |

За отриманими значеннями твердості металу в кожній зоні контролю у відповідності з вимогами НД визначаються фактичні механічні характеристики основного металу равлика і основного металу, зварних швів і навколошовних зон перехідників всмоктувального та напірного патрубків ГЦН. При отриманні результатів твердості, що виходять за межі нормативних значень, необхідно в цих зонах провести зняття поверхневого шару з видаленням можливо знеуглецьованого або наклепанного шару металу і з забезпеченням необхідної шорсткості поверхні, але не виводячи товщини за мінімально-допустимі значення, після чого провести повторне вимірювання твердості. Якщо при повторному вимірюванні отримані показники, які не відповідають встановленим нормам, необхідно при додаткових вимірах визначити розміри ділянки із зміненими показниками. За результатами вимірювання твердості металу ГЦН з використанням [10] дається пряма оцінка їх міцнісних характеристик: межі міцності  $R_{Тм}$ , межі текучості  $R_{Тр0,2}$ , відносного звуження  $Z_T$ , відносного подовження  $A_T$ .

При проведенні УЗТ фіксується спільна товщина відкладень продуктів корозії і неушкодженого металу, тому розрахунки на основі даних експлуатаційного контролю можуть мати значну похибку. В якості альтернативи необхідно використання розрахункових комп'ютерних кодів (КК) [12], що дозволяють розраховувати утонення стінок. На основі вимірних механічних характеристик зварних швів та отриманих характеристик основного металу здійснюються розрахунки напружено-деформованого стану ГЦН з використанням комп'ютерної програми «APM Structure» (WinMachine).

### Висновки

Правильний вибір параметрів, які характеризують основні властивості металу і за додатковими розрахунками визначають деградаційні властивості елементів і конструкцій ГЦН і вибір вимірювальних приладів для проведення технічної

діагностики дозволяють за спеціально розробленою програмою виконати комплексну якісну оцінку поточного технічного стану насоса і оцінку залишкового ресурсу для одержання науково обґрунтованих об'єктивних висновків про можливість продовження ресурсу ГЦН.

#### Список літератури

- 1 НП 306.2.099-2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації АЕС у понад проектний строк за результатами здійснення періодичної оцінки безпеки. Затверджені наказом Держатомрегулювання від 26.11.2004, №181.
- 2 TACIS U3.01/06 (UK/TS/38). Надання підтримки Державному комітету ядерного регулювання України в оцінці впровадження заходів з підвищення безпеки та програм управління старінням на блоках АЕС.МАГАТЕ.
- 3 Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors. Recommendations on the Scope and Content of Programmers for Safe Long Term Operation. Final Report of the Extrabudgetary Programmer on Safety Aspects Long Term Operation of Water Moderated Reactors / IAEA-EBP-SALTO. – Vienna: IAEA. – 2007.
- 4 Кучер, С. А. Исследование параметров, определяющих старение главных циркуляционных насосов атомных станций Украины / М. П. Гиря, С. А. Кучер // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2016. – №1(43). – С. 14-24.
- 5 Аркадов, Г. В. Проблемы эрозионно-коррозионного износа трубопроводов АЭС. Материаловедение и контроль металла / Г. В. Аркадов, В. И. Бараненко, В. В. Потопов, А. А. Просвирнов, М. М. Нафталь, О. М. Гулина // *Восьмая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»*. Москва, 2012.
- 6 M. Helmi Attia Fretting fatigue and wear damage of structural components in nuclear power stations—Fitness for service and life management perspective / M. Helmi Attia // *Tribology International*. – 2006. – vol. 39, is. 10. – P. 1294-1304. – doi: 10.1016/j.triboint.2006.02.052.
- 7 Долинский, В. М. Оценка качества сварных соединений сосудов и трубопроводов по результатам технического диагностирования / В. М. Долинский, В. И. Черемская // *Сварщик*. – 2005. – №2(42). – С.6-9.
- 8 ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Утверждены ГАЭН СССР. – 1987.
- 9 ГОСТ 22761-77. Метод вимірювання твердості за Брінеллем переносними твердомірами статичної дії.
- 10 ПНАЭ Г-7-031-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Ультразвуковой контроль. Часть 3. Измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозионных покрытий.
- 11 МТ-Т. 0.08.158-05. Методика оцінки технічного стану за міцнісними параметрами і розрахункового обґрунтування перепризначеного ресурсу корпусів насосів АЕС України.

- 12 Prosek, A. Quantitative assessment of thermal–hydraulic codes used for heavy water reactor calculations / A. Prosek, D. J. Richards, B. Mavko // *Nuclear Engineering and Design*. – 2006. – Vol. 236, is. 3. – P. 295-308. – doi:10.1016/j.nucengdes.2005.07.004.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 NP 306.2.099-2004. Zagal'ni vymogy do prodovzhennja ekspluatacii' AJeS u ponad proektnyj strok za rezul'tatamy zdjysnennja periodychnoi' ocinky bezpeky. Zatverdzeni nakazom Derzhatomreguljuvannja vid 26.11.2004, № 181.
- 2 TACIS U3.01/06 (UK/TS/38). Nadannja pidtrymky Derzhavnomu komitetu jadernogo reguljuvannja Ukraïny v ocinci vprovadzhennja zahodiv z pidvyshhennja bezpeky ta program upravlinnja starinnjam na blokah AES.
- 3 Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors. Recommendations on the Scope and Content of Programmers for Safe Long Term Operation. Final Report of the Extrabudgetary Programmer on Safety Aspects Long Term Operation of Water Moderated Reactors / IAEA-EBP-SALTO. Vienna : IAEA, 2007.
- 4 Kucher, S., Giryа, M. Issledovanie parametrov, opredelyaushih starenie glavnyh cirkuljacionnyh nasosov atomnih stancij Ukraïny. Kompresornoe i tnrtrggticheskoe mashinostroenie. 2016, 1(43), 14-24.
- 5 Arkadov, G., Baranenko, V., Potapov, V., Prosvirnov, A., Naftal, M., Gulina, O. Problemy erozjno-korrozijnogo iznosa truboprovodov AJeS. Materialovedenie I control metalla. *Conference «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoj energetiki»*. Moscow, 2012.
- 6 M. Helmi Attia Fretting fatigue and wear damage of structural components in nuclear power stations—Fitness for service and life management perspective. *Tribology International*, 2006, 39(10), 1294-1304, doi: 10.1016/j.triboint.2006.02.052.
- 7 Dolinskij, V., Cheremskaj, V. Ocenka kachestva svarnyh soedinenij sosudov i truboprovodov po rezul'tatam tehničeskogo diagnostirovanij. *Svarshik*. 2005, 2(42), 6-9.
- 8 PNAJe G-7-002-86. Normy rascheta na prochnost' oborudovanija i truboprovodov atomnyh jenergeticheskikh ustanovok. Utverzhdeny GAJeN SSSR, 1987.
- 9 GOST 22761-77. Metod vymiruvayyj tverdosti za Brinelle perenosnymi tverdomerami statychnoy dij; Vveden 01.01.77. Moscow: Izd-vo standartov, 1977, 20.
- 10 PNAJe G-7-031-91. Unifichirovanye metodiki kontrolya osnovnyh materialov svarnyh soedinenij I naplavki oborudovanij I truboprovodov AJeU. Ultrozvukovoj control. Izmerenie tolshiny monometallov, bimetallov i antikoroziionnyh pokrytij.
- 11 МТ-Т.0.08.158-05. Metodika ochinki tehničnogo stanу za michnisnymi parametramy i rozrahunkovogo obgruntuванnj perepriznachenogo resursu korpusiv nasosiv AJeS Ukraïny.
- 12 Prosek, A., Richards, D. J., Mavko, B. Quantitative assessment of thermal–hydraulic codes used for heavy water reactor calculations. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(3), 295-308. doi:10.1016/j.nucengdes.2005.07.004.

#### Відомості про авторів (About authors)

Кучер Сергій Олександрович – начальник відділу міцності судів і насосів ядерної установки, Експертно-технічний центр «Енергоресурс», м. Київ, УКРАЇНА; e-mail: kucher0972@ukr.net

**Kucher Sergey Aleksandrovich** – Head of Department of strength of vessels and pumps LLC "Expert-technical center "ENERGYRESOURCE", Kiev, Ukraine; e-mail: kucher0972@ukr.net

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Кучер, С. О.** Контроль основных властивостей металу головного циркуляційного насосу атомної станції / **С. О. Кучер** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.16.

*Please cite this article as:*

**Kucher, S.** Control the basic properties of the metal of the main circulation pump nuclear power station. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 107-112, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.16.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Кучер, С. А.** Контроль основных свойств металла главного циркуляционного насоса атомной станции / **С. А. Кучер** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.16.

**АННОТАЦИЯ** Стаття посвящена контролю основных свойств металла главного циркуляционного насоса, который необходим для оценки технического состояния насосного оборудования реакторного отделения атомной электростанции при рассмотрении вопросов по периодической переоценке безопасности его эксплуатации. Проведение контроля позволит проанализировать механизмы старения с последующим выявлением эффектов старения для каждого элемента конструкции насоса и полное понимание их возможных последствий.

**Ключевые слова:** главный циркуляционный насос, техническое состояние, оценка безопасности, твердость металла, толщинометрия

*Надійшла (received) 27.06.2016*



УДК 614.73.16

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.17

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА В ПНЕВМОКЛАССИФИКАТОРАХ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

**А. В. ЛИТВИНЕНКО\*, Н. П. ЮХИМЕНКО**

*Кафедра процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумской государственной  
университет, Сумы, УКРАИНА  
\*email: andrew.litvinenko@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** Процессы классификации заключаются в разделении сыпучих материалов на две и более фракции по размеру частиц, причем содержание примесей в этих продуктах допускается в небольшом количестве. Высокая степень разделения при осуществлении процессов классификации дисперсных материалов влияет не только на расходные нормы сырья и его качество, но и определяет производительность и эффективность работы других машин и аппаратов в технологической схеме, в конечном итоге сказывается на технико - экономических показателях всего производства. Данная работа посвящена созданию математической модели гидродинамики движения двухфазного потока. Описана математическая модель однофазного потока (газовая фаза). Так же описана математическая модель двухфазного потока, на примере газовой фазы и твердой частицы.

**Ключевые слова:** Пневмоклассификатор; частичка; траектория; скорость витания; профиль скорости; сечение.

## THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRODYNAMICS MOTION OF TWO PHASE ASCENDING FLOW IN PNEUMATIC CLASSIFIERS OF VARIABLE CROSS-SECTION

**A. V. LITVYNENKO\*, M. P. YUKHYMENKO**

*Processes and Equipment of Chemical and Petroleum-Refineries Department, Sumy state university, Sumy, UKRAINE*

**ABSTRACT.** Classification processes involve division of granular materials into two and more fractions according to the particles size. Notably, impurity content in these products is acceptable in small amounts. The high separation level during the particulates classification processes affects not only the raw materials unit consumption and its quality but also has an impact on the productivity and efficiency of other machines and apparatus in the flowsheet and, eventually, on the technical-and-economic indicators of the production in general. This paper deals with the developing the hydrodynamics mathematical model of two phase flow motion. To reach the set goal, the authors created the mathematical model of one phase flow (gas phase). The next stage was the creation of the mathematical model of two phase flow, as exemplified by the gas phase and the solid particle. This model is unique due to the fixation of the dependence of solid particles velocity on the apparatus body and the gas flow profile. The authors worked out the equations to define the velocity of the gas flow and the velocity of the solid particle at every point of the variable cross-section apparatus body. The authors developed the characteristic curve of gasflow line in the pneumatic classifier body. The solid particle trajectories were defined in the body of the pneumatic classifier with variable cross-section. The velocity distribution and the influence of the gas flow on the individual solid particle are deeply analyzed in the paper. The conclusions also deal with the trajectory change of the individual particle within the apparatus body.

**Keywords:** pneumatic classifier; particle; trajectory; terminal velocity; velocity profile; cross-section.

### Введение

Процессы классификации заключаются в разделении сыпучих материалов на две и более фракции по размеру частиц, причем содержание примесей в этих продуктах допускается в небольшом количестве. Высокая степень разделения при осуществлении процессов классификации дисперсных материалов влияет не только на расходные нормы сырья и его качество, но и определяет производительность и эффективность работы других машин и аппаратов в технологической схеме, в конечном итоге сказывается на технико - экономических показателях всего производства. Структура движения двухфазных потоков в

технологических аппаратах, в том числе и пневмоклассификаторах, оказывает большое влияние на эффективность проводимых в них процессов. Эффективность в значительной степени определяется полем течения газового потока в рабочем объеме аппарата, которое влияет на профиль скорости твердой фазы и, соответственно на качество разделения сыпучих полидисперсных материалов на крупную и мелкую фракции.

### Цель работы

Создание математической модели гидродинамики движения двухфазного потока в пневмоклассификаторе переменного сечения. Первой

ступеню является создание математической модели однофазного потока (газовой фазы). Следующим этапом является включение в систему одиночной твёрдой частицы для создания математической модели двухфазного потока, на примере газовой фазы и твёрдой частицы.

**Изложение основного материала**

Одним из широко распространённых типов пневмокласификаторов, согласно классической классификации [1], являются гравитационные. Данные аппараты относятся к равновесным, то есть работающим по принципу уравнивания частиц граничной крупности в потоке за счёт равенства гравитационных сил и аэродинамического сопротивления газового потока. Но более практичным показателем оценки равновесной классификации является скоростное число [2], в виде соотношения и усредненной по сечению скорости газового потока  $W_G$  к скорости витания твёрдой частицы  $U_T$ , которое равно  $W_G / U_T = 1$ . В действующих пневмокласификаторах реальный процесс разделения не является статическим, поэтому  $W_G / U_T > 1$ , то есть при  $W_G > U_T$  происходит вынос частиц определённого размера из взвешенного слоя. Реализация данного условия в пневмокласификаторах постоянного сечения не обеспечит технологически заданного гранулометрического состава разделяемых фракций, так как крупная фракция будет «засорена» мелкими частицами, а мелкая фракция - крупными. Это связано с отсутствием эффекта расслоения слоя взвешенных частиц по высоте аппарата постоянного сечения. Поэтому корпус в пневмокласификаторах зачастую выполняют в виде расширяющегося кверху конуса. Такая форма характерна для сепарационного пространства аппаратов псевдоожиженного слоя, пневмокласификаторов Гоннеля, с газораспределительными решетками, клиновидными и полочными элементами, расположенными по высоте на разных уровнях конусной части аппарата [3].

На равновесие процесса разделения полидисперсного материала на крупную и мелкую фракции, а соответственно и на величину  $W_G / U_T$ , влияет фактический профиль скоростей газового потока в поперечном сечении зоны сепарации, который будет различным по высоте аппарата в виде расширяющегося конуса. Так же на скорость витания частиц в газовом потоке будет оказывать влияние турбулентность потока, наличие завихрений, стеснённость потока за счёт концентрации частиц, наличия стенок аппарата. Указанные причины вносят изменения в величину экспериментально замеренной скорости витания [4-5]. Поэтому более корректным будет учёт влияния указанных параметров на истинную скорость твёрдой частицы в потоке.

Изменение скорости твёрдой частицы при её движении в потоке среды описывается вторым законом Ньютона. Наиболее полное аналитическое решение дифференциального уравнения 1-го порядка, описывающее движение частицы в газовом потоке представлено в монографиях [4-13]. Представленные в этих работах зависимости зачастую носят теоретический характер, решения сложные по структуре, содержат трудноопределимые параметры, поэтому их сложно применить для инженерных расчётов конкретных конструкций пневмокласификаторов.

В данной работе рассматривается математическая модель гидродинамики движения двухфазного восходящего потока в канале в виде расширяющегося конуса [14]. Особенностью данной модели является учёт взаимного влияния на скорость твёрдой частицы скоростного профиля газового потока и влияния стенок аппарата, сечение которого является переменным по высоте.

На первом этапе математического моделирования рассмотрим динамику движения одиночной шарообразной твёрдой частицы в вертикальном канале в условиях незначительно объёмной концентрации частиц  $\beta < 0,005 - 0,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ . В этих условиях силами столкновения частиц одна с другой, со стенками аппарата, а также трением о стенки аппарата можно пренебречь.

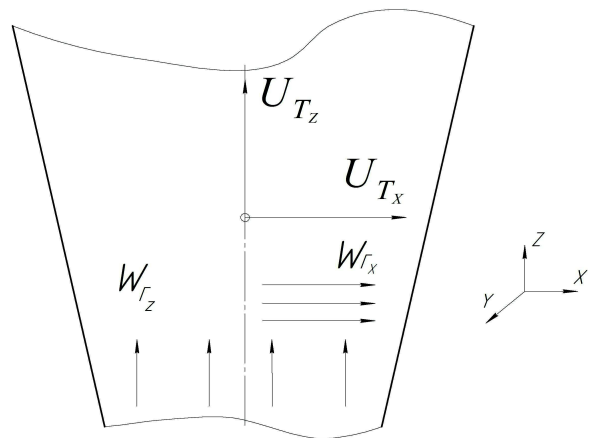


Рис. 1 – Схема движения твёрдой частицы в вертикальном расширяющемся канале

Тогда уравнения, которые описывают движение частицы в вертикальном направлении (Z) и в горизонтальном (X) (рис.1), представлены в виде системы:

$$\begin{cases} m_T \frac{dU_{Tz}}{d\tau} = -m_T g + S_T \zeta \frac{\rho_G (W_{Gz} - U_{Tz})^2}{2} \\ m_T \frac{dU_{Tx}}{d\tau} = S_T \zeta \frac{\rho_G (W_{Gx} - U_{Tx})^2}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $m_T$  - масса твёрдой частички, кг;  
 $U_T$  - скорость твёрдой частички, м/с;  
 $S_T$  - площадь миделевого сечения шарообразной частички, м<sup>2</sup>;  
 $\zeta$  - коэффициент гидродинамического сопротивления,  $\zeta = f(\text{Re}_T)$ ;  
 $\text{Re}_T$  - критерий Рейнольдса относительно двухфазного потока.

После преобразований системы уравнений (1), получаем:

$$\begin{cases} U_{T_z} \frac{dU_{T_z}}{dZ} = -g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_r (W_{r_z} - U_{T_z})^2}{\rho_r d_T} \\ U_{T_x} \frac{dU_{T_x}}{dX} = \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_r (W_{r_x} - U_{T_x})^2}{\rho_r d_T} \end{cases}, \quad (2)$$

После интегрирования методом Рунге-Кутты 4-го порядка для предельного значения скорости  $U_{T_z} = 0$  и  $U_{T_x} = 0$ , получаем соответствующие градиенты:

$$D_z(z, U_{T_z}) = \frac{-g + \frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_r (W_{r_z} - U_{T_z})^2}{\rho_r d_T}}{U_{T_z}}, \quad (3)$$

где  $\rho_r$  - плотность твёрдой частички, кг/м<sup>3</sup>;  
 $d_T$  - диаметр твёрдой частички, мм;  
 $W_{r_z}$  - скорость газового потока по оси Z, м/с.

$$D_x(x, U_{T_x}) = \frac{\frac{3}{4} \zeta \frac{\rho_r (W_{r_x} - U_{T_x})^2}{\rho_r d_T}}{U_{T_x}}, \quad (4)$$

где  $W_{r_x}$  - скорость газового потока по оси X, м/с.

В уравнения (3) и (4) входят соответствующие значения скоростей газового потока в вертикальном  $W_{r_z}$  и горизонтальном  $W_{r_x}$  направлениях, которые влияют на скорости твёрдой частицы в указанных направлениях, и поэтому требуют аналитического определения.

Из уравнения изменения количества движения газовой фазы, которое учитывает силы трения газового потока о стенки аппарата, и соответствующих преобразований получим:

$$\rho_r W_{r_z} \frac{dW_{r_z}}{dz} = -\frac{\lambda_{TP} \rho_r W_{r_z}^2}{D_\sigma 2}, \quad (5)$$

Коэффициент трения газового потока об стенки канала аппроксимируется зависимостью вида:

$$\lambda_{TP} = \frac{C}{\text{Re}^n}, \quad (6)$$

где  $C$ ;  $n$  - экспериментальные коэффициенты ( $0 \leq n \leq 1$ ), которые зависят от числа Рейнольдса ( $\text{Re}$ ).

Количественную оценку значений эмпирических коэффициентов  $C$  и  $n$  определяем из формулы:

$$R_{(n)} = \sum_{k=1}^N \left[ w_0^n - \frac{C_{(n)} v^n}{2\theta} \left( \frac{1}{d_0^n} - \frac{1}{d_k^n} \right) \right]^{\frac{1}{n}} - w_k^n, \quad (7)$$

Используя формулу (7), строим график зависимости  $R(n)$  от значения экспериментального коэффициента ( $n$ ) (рис.2):

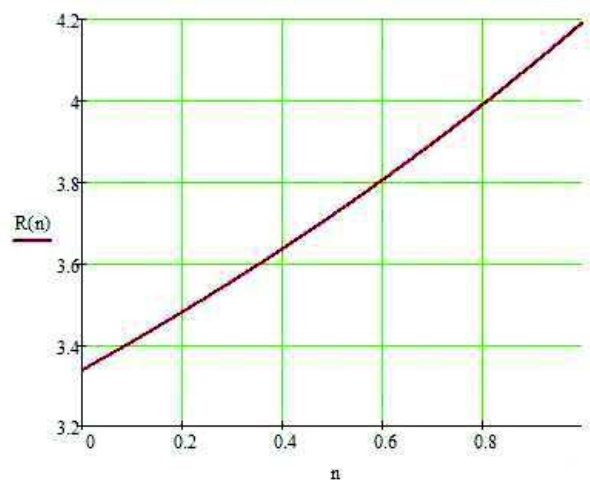


Рис. 2 – Зависимость погрешности  $R(n)$  от значения коэффициента ( $n$ )

Из графика (рис.2) видно, что погрешность минимальна при  $n = 0$ . Это означает что режим движения газового потока – развитый турбулентный, а значит расчёт следует проводить согласно формуле:

$$R_{(C)} = \sum_{k=1}^N \left[ w_1 \cdot \left( \frac{d_k}{d_1} \right)^{-\frac{C}{2\theta}} - w_k^n \right]^2, \quad (8)$$

Определив погрешность, видно, что значение коэффициента  $C$  стремится к единице, поэтому для его расчёта используем формулу:

$$C = 2\theta \cdot \frac{\sum_{k=1}^N \left( \ln \left( \frac{d_1}{d_k} \right) \ln \left( \frac{w_k}{w_1} \right) \right)}{\sum_{k=1}^N \left( \ln \left( \frac{d_1}{d_k} \right)^2 \right)}, \quad (9)$$

Тогда скорость газового потока в направлении  $Z$  по высоте канала:

$$W_{gz} = w_0 \cdot \left[ \frac{d_k}{d_1} \right]^{2\theta}, \quad (10)$$

Изменения скорости газового потока в направлении  $X$  в поперечном сечении канала:

$$W_{gx} = W_{gz} \left( 1 - \frac{X}{B} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (11)$$

где  $X$  - координаты точки по сечению канала, в которой производят расчёт значения скорости газового потока  $W_{gx}$  по оси  $X$ , м;

$B$  - длина сечения канала, м.

Экспериментальная постоянная  $n$  из условия минимума суммарного квадратического отклонения теоретических значений скорости потока от соответствующих экспериментальных значений:

$$n = \frac{\sum_{m=1}^M \left( \ln \left( 1 - \frac{x_m}{B} \right) \ln \left( \frac{w_{x_m}}{w_1} \right) \right)}{\sum_{m=1}^M \left( \ln \left( \frac{w_{x_m}}{w_1} \right)^2 \right)}, \quad (12)$$

Траектория движения газового потока в условиях отсутствия загруженности твёрдыми частицами, определяется зависимостью:

$$z_{(x,x_0)} = \frac{B \cdot n}{n-1} \left[ \left( 1 - \frac{x_0}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left( 1 - \frac{x}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (13)$$

где  $x_0$  - координаты точки входа газового потока в рабочий объём аппарата по оси  $X$ , м.

### Обсуждение результатов

Полученные решения уравнений дают возможность определить скорость газового потока в

каждой точке аппарата, а также оценить изменения скорости по высоте и ширине корпуса. Это важно для подбора рациональных гидродинамических параметров потока разделения полидисперсной смеси зернистых материалов. Уравнение (13) даёт возможность оценить траектории движения газа в рабочем пространстве корпуса аппарата, а также оценить влияние углов раскрытия ромба на изменения в движении газового потока (рис.3).

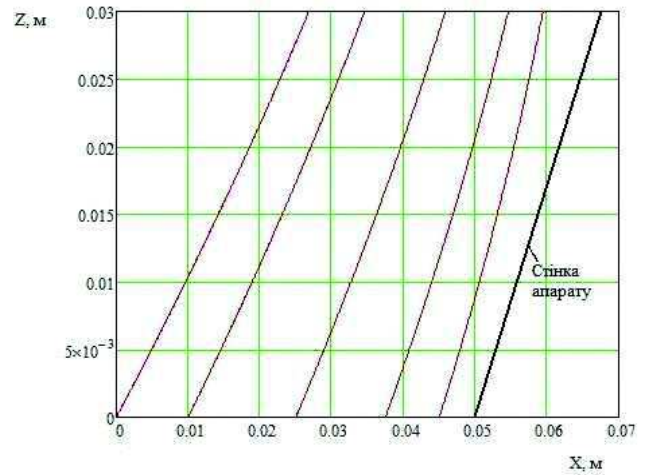


Рис.3 – Линии тока газа в рабочем пространстве аппарата

В уравнения (3) и (4) входят соответствующие значения скорости газового потока в вертикальном

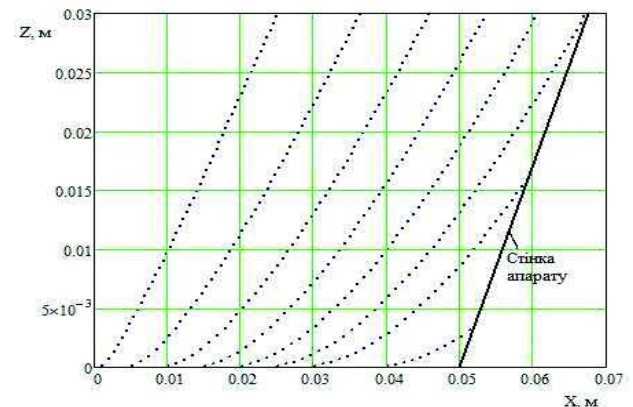


Рис.4 – Траектории движения твёрдой частички в аппарате

$U_{Tz}$  и горизонтальном  $U_{Tx}$  направлениях, которые дают возможность определить траектории частиц в канале аппарата.

Из представленных (рис.4) траекторий видно, что частичка в нижней части корпуса имеет практически нулевую скорость, а потом начинает постепенно разгоняться под действием газового потока. Скорость в вертикальном направлении больше, нежели в горизонтальном. Оценив

траектории, можно сделать вывод что газовый поток достаточно сильно влияет на одиночную частичку, и поджимает ее к стенкам аппарата.

### Выводы

Таким образом, определение профиля скоростей твёрдой фазы с учётом взаимного влияния распределения скоростей газового потока в вертикальном и горизонтальном направлении вертикального канала аппарата переменного сечения даёт возможность более корректно оценить особенности выноса мелкой фракции из взвешенного слоя материала.

### Список литературы

1. Устинов, С. Г. Инерционная сепарация пыли / С. Г. Устинов, Н. И. Зверев // М.: Энергия. – 1974. – 168 с.
2. Johanson, K. Quantitative measurement of particle segregation mechanisms / K. Johanson, C. Eckert, D. Ghose, M. Djomlija, M. Hubert // *Powder Technology*. – 2005. – No 159(1). – P. 1-12. – doi: 10.1016/j.powtec.2005.06.003.
3. Юхименко, Н. П. Аппараты взвешенного слоя / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал, Н. П. Кононенко, А. П. Филонов // Сумы: Собор. – 2003. – 304 с.
4. Литвиненко, А. В. Исследование скорости витания полидисперсных материалов для определения возможности их разделения в пневмоклассификаторах / А. В. Литвиненко, Н. П. Юхименко // *Журнал инженерных наук, СумГУ*. – 2014 – Т.1 №3 – В9-В13.
5. Бабуха, Г. Л. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси / Г. Л. Бабуха, Н. И. Рабинович // К.: Наукова думка. – 1969. – 219 с.
6. Latz, A. Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow / A. Latz, S. Schmidt // *Granul. Matter*. – 2010. – No12 (4). – P. 387-397. – doi: 10.1007/s10035-010-0187-6.
7. Шрайбер, А. А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым полидисперсным веществом / А. А. Шрайбер, В. Н. Милотин, В. П. Яценко // Киев.: Наукова думка. – 1980. – 252 с.
8. Шрайбер, А. А. Турбулентные течения газозвеси / А. А. Шрайбер, Л. Б. Гавин, В. А. Наумов // Киев.: Наукова думка. – 1987. – 240 с.
9. Goldschmidt, M. J. V. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds: comparison and validation of 3D discrete particle and continuum models / M. J. V. Goldschmidt, R. Beetstra, J. A. M. Kuipers // *Powder Technol.* – 2004. – No 142 (1). – P. 23-47. – doi: 10.1016/j.powtec.2004.02.020
10. Tingwen Li Numerical investigation of gas mixing in gas-solid fluidized beds / Tingwen Li, Yongmin Zhang, John R. Grace, Xiaotao Bi // *AIChE J.* – 2010. – No 56 (9). – P. 2280-2296. – doi: 10.1002/aic.12144.
11. McCarthy, J. J. Turning the corner in segregation / J. J. McCarthy // *Powder Technology*. – 2009. – No 192. – P. 137-142. – doi:10.1016/j.powtec.2008.12.008.
12. Heinrich, S. Particle population modeling in fluidized bed spray granulation – analysis of the steady state and unsteady behavior / S. Heinrich, M. Peglow, M. Ihlow, L. Mörl // *Powder Technol.* – 2003. – No 130 – P. 154-161. – doi:10.1016/S0032-5910(02)00259-0.
13. Hilton J. E. Dynamics of gas–solid fluidized beds with non-spherical particle geometry / J. E. Hilton, L. R. Mason, P. W. Cleary // *Chem. Eng. Sci.* – 2010. – No 65. – P.1584-1596. – doi:10.1016/j.ces.2009.10.028.
14. Litvinenko A. Pneumatic Classification Of The Granular Materials In The “Rhombic” Apparatus / A. Litvinenko, M. Yukhimenko // *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (JMIE)*. – 2014. – Vol 1-2. – P.1-3. – doi:10.12776/mie.v13i1-2.340.

### Bibliography (transliterated)

1. Ustinov, S. G., Zverev, N. I. Inertsionnaya separatsiya pyli. Moscow: Energiya, 1974, 168 p.
2. Johanson, K., Eckert, C., Ghose, D., Djomlija, M., Hubert, M. Quantitative measurement of particle segregation mechanisms. *Powder Technology*. 2005, **159**, 1-12, doi: 10.1016/j.powtec.2005.06.003.
3. Yuhimenko, N. P., Vakal, S. V., Kononenko, N. P., Filonov, A. P. Apparaty vzveshennogo sloya. Sumyi: Sobor, 2003, 304 p.
4. Litvinenko, A. V., Yuhimenko, N. P. Issledovanie skorosti vitaniya polidispersnykh materialov dlya opredeleniya vozmozhnosti ih razdeleniya v pnevmoklassifikatorah. *Zhurnal inzhenernykh nauk, SumGU*, 2014, **1-3**, V9-V13.
5. Babuha, G. L., Rabinovich, N. I. Mehannika i teploobmen potokov polidispersnoy gazovzvesi. Kyiv: Naukova dumka, 1969, 219 p.
6. Latz, A., Schmidt, S. Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow. *Granul. Matter*, 2010, **12** (4), 387-397, doi: 10.1007/s10035-010-0187-6.
7. Shrayber, A. A., Milyutin, V. N., Yatsenko, V. P. Gidromekhanika dvuhkomponentnykh potokov s tvYordym polidispersnym veschestvom. Kiev: Naukova dumka, 1980, 252 p.
8. Shrayber, A. A., Gavin, L. B., Naumov, V. A. Turbulentnyie techeniya gazovzvesi. Kiev: Naukova dumka, 1987, 240 p.
9. Goldschmidt, M. J. V., Beetstra, R., Kuipers, J. A. M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds: comparison and validation of 3D discrete particle and continuum models. *Powder Technol.*, 2004, **142** (1), 23-47, doi: 10.1016/j.powtec.2004.02.020.
10. Tingwen Li, Yongmin Zhang, John R. Grace, Xiaotao Bi Numerical investigation of gas mixing in gas–solid fluidized beds, *AIChE J.*, 2010, **56** (9), 2280-2296, doi: 10.1002/aic.12144.
11. McCarthy, J. J. Turning the corner in segregation. *Powder Technology*, 2009, **192**, 137-142, doi:10.1016/j.powtec.2008.12.008.
12. Heinrich, S., Peglow, M., Ihlow, M., Mörl, L. Particle population modeling in fluidized bed spray granulation — analysis of the steady state and unsteady behavior, *Powder Technol.* 2003, **130**, 154-161, doi:10.1016/S0032-5910(02)00259-0.
13. Hilton, J. E., Mason, L. R., Cleary, P. W. Dynamics of gas–solid fluidized beds with non-spherical particle geometry. *Chem. Eng. Sci.* 2010, **65**, 1584-1596, doi:10.1016/j.ces.2009.10.028.
14. Litvinenko, A., Yukhimenko, M. Pneumatic Classification Of The Granular Materials In The “Rhombic” Apparatus. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering (JMIE)*, 2014, **1-2**, 1-3, doi:10.12776/mie.v13i1-2.340.

## Сведения об авторах (About authors)

**Литвиненко Андрей Владимирович** – асистент, кафедра Процессы и оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумской государственной университет; г. Сумы, Украина; e-mail: andrew.litvinenko@gmail.com.

**Andrii Lytvynenko** – assistant, Department Processes and Equipment of Chemical and Petroleum-Refineries, Sumy State University, Sumy, Ukraine; e-mail: andrew.litvinenko@gmail.com.

**Юхименко Николай Петрович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра Процессы и оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумской государственной университет; г. Сумы, Украина; e-mail: yunp@ukr.net.

**Mykola Yukhymenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department Processes and Equipment of Chemical and Petroleum-Refineries, Sumy State University, Sumy, Ukraine; e-mail: yunp@ukr.net.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Литвиненко, А. В.** Математическая модель гидродинамики движения двухфазного восходящего потока в пневмоклассификаторах переменного сечения / **А. В. Литвиненко, Н. П. Юхименко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 113-118. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.17.

*Please cite this article as:*

**Lytvynenko, A. V., Yukhymenko, M. P.** The mathematical model of hydrodynamics motion of two phase ascending flow in pneumatic classifiers of variable cross-section // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 113-118, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.17.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Литвиненко, А. В.** Математична модель гідродинаміки руху двофазного висхідного потоку в пневмокласифікаторах змінного перерізу / **А. В. Литвиненко, М. П. Юхименко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 113-118. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.17.

**АНОТАЦІЯ** Процеси класифікації полягають у поділі сипучих матеріалів на дві і більше фракції за розміром частинок, причому вміст домішок в цих продуктах допускається в невеликій кількості. Високий ступінь поділу при здійсненні процесів класифікації дисперсних матеріалів впливає не тільки на витратні норми сировини і його якість, а й визначає продуктивність і ефективність роботи інших машин та апаратів в технологічній схемі, в кінцевому підсумку позначається на техніко - економічних показниках всього виробництва. Дана робота присвячена створенню математичної моделі гідродинаміки руху двофазного потоку. Описано математичну модель однофазного потоку (газова фаза). Так само описана математична модель двофазного потоку, на прикладі газової фази і твердої частинки.

**Ключові слова:** Пневмокласифікатор; частинка; траєкторія; швидкість витання; профіль швидкості; переріз.

Поступила (received) 14.06.2016

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

В. В. МОРГУНОВ<sup>1\*</sup>, Н. В. ДИДЕНКО<sup>2</sup>, Р. М. ТРИЦ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> УИПА, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> ХНАДУ, Харьков, УКРАИНА

\*email: volodymyr.morgunov@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** В статье приведены результаты численных экспериментов по моделированию поглощения энергии гамма-излучения с/без использования предложенных радиационно-защитного костюма и радиационно-защитного материала (свинцовое стекло в виде микросфер). Предложенный метод численных экспериментов приводит к снижению человеческих, временных и финансовых ресурсов. При проведении численных экспериментов использовался программный комплекс GEANT4. Полученные результаты позволяют рассчитывать эффективность радиационно-защитной одежды.

**Ключевые слова:** численный эксперимент, радиационно-защитная одежда, гамма-излучение, GEANT4.

## NUMERICAL CALCULATION OF RADIATION PROTECTIVE CLOTHING EFFICIENCY BY USING MONTE CARLO METHOD

V. MORGUNOV<sup>1\*</sup>, N. DIDENKO<sup>2</sup>, R. TRISHCH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UEPA, Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup> KhNAHU, Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The article presents the results of numerical experiments on modeling of absorption of gamma-radiation with/without using the proposed radiation-protective suit and radiation-shielding material (lead glass in the form of microspheres). The proposed method numerical experiments leads to the reduction of human, time and financial resources. When conducting numerical experiments we used the software package GEANT4. When conducting numerical experiments, we used a phantom of the human body (total of 40 organs). Radiation-protective suit was developed in a graphical environment on 3D modeling and visualization 3ds MAX and the obtained model was introduced into the software package GEANT4 with the use a graphics library CADMesh.

The calculations were performed for gamma radiation in the energy range from 100 keV to 1.5 MeV with a step of 50 keV. For each point the number of gamma-rays was equal to  $10^6$ . The size of the gamma source was  $2 \times 0.75$  m. Distance between source and irradiated object was 0,5 m. One run of calculation took time about 120 min.

The results of numerical calculations show the following: the efficiency of reducing energy absorption for organs that are not fully covered by a radiation-protective suit can be worse than without the use of suit; the reduction efficiency of absorption of energy of gamma radiation falls with increasing energy.

The obtained results allow to design and calculate the efficiency of radiation-protective clothing.

**Keywords:** numerical simulation, radiation protective clothing, gamma radiation, GEANT4.

### Введение

Расчет защитных свойств радиационно-защитных материалов требует проведения большого количества экспериментов. Значительно сократить этот объем работы и времени позволяет использование математических методов.

Использование методов численного моделирования широко используется для расчета технологических параметров различных процессов. Особенно активно эти методы применяются в области моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Это обусловлено следующими факторами: ростом вычислительной мощности компьютерной техники и развитием программного обеспечения; существуют ситуации, когда невозможно измерить физические величины, относящиеся к ионизирующему излучению (например, радиационная обработка музейных

экспонатов, расчет эквивалентной поглощенной дозы внутренних органов); численное моделирование дополняет дозиметрические измерения, позволяет проводить большое количество вычислительных экспериментов, что способствует удешевлению и ускорению разработки новых радиационных технологий и материалов и т.д.

### Цель работы

Целью работы является проведение численного расчета эффективности радиационно-защитной одежды с помощью метода Монте-Карло. Авторами был предложен радиационно-защитный материал на основе свинцового стекла [1]. Выбор соответствующего математического метода и способа расчета поглощенной дозы для расчета радиационно-защитных свойств материалов был сделан в [2].

**Описание постановки численного эксперимента**

Оценка поглощенной дозы ионизирующего излучения органами человека является сложной задачей ввиду того, что человеческое тело состоит из множества неоднородных органов. Для моделирования поглощенной дозы органами человека использовался идеализированный фантом человека [3]. При использовании идеализированного фантома человека были сделаны следующие упрощения:

1. Фантом человека состоит из органов, форма которых имеет простые геометрические формы, приблизительно соответствующих размеру и форме органам взрослого человека. Каждый «орган» определен внутри фантома, и являющийся гомогенным по составу и плотности. Перечень рассматриваемых органов представлен в табл. 1. Масса фантома человека принимается 70 кг.
2. Источник излучения – прямоугольной формы, излучающий фотоны/электроны одной энергии.

Был промоделирован фантом мужского организма. Модель мужского фантома представлена на рис. 1.

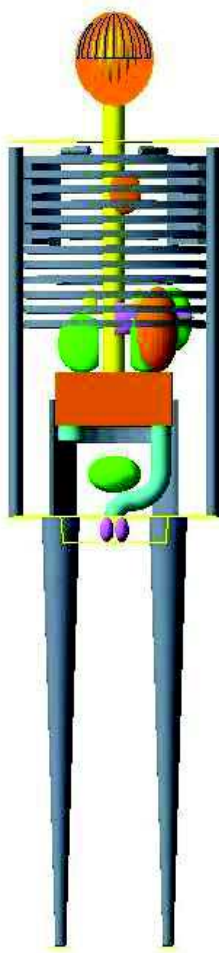


Рис. 1 – Фантом человека, используемого при численном моделировании эффективности радиационно-защитной одежды.

Были проведены численные эксперименты по определению эффективности снижения гамма-излучения при прохождении через радиационно-защитную одежду (рис. 2) из предложенного материала [1]. Источник гамма-излучения представляет собой плоскость, равномерно испускающую моноэнергетические фотоны. Расстояние между гамма-источником и продольной осью фантома составило 0,5 м. Размеры гамма-источника составили 2x0,75 м. Расчеты проводились в диапазоне энергий гамма излучения от 100 кэВ до 1,5МэВ с шагом 50 кэВ для случая с защитным костюмом и без для каждого органа, представленных в таблице 1. Для каждой точки количество гамма-лучей равнялось 10<sup>6</sup>. Во всем диапазоне энергий производился расчет поглощенной энергии каждым из органов и производился расчет эффективности радиационно-защитной одежды.

При проведении численных экспериментов в качестве материала радиационно-защитной одежды бралось свинцовое стекло (плотность – 4460 кг/м<sup>3</sup>). Его состав дан в табл. 2. Объем защитной одежды при моделировании составил 0,01545 м<sup>3</sup>, масса - 68,9 кг.

Таблица 1 – Список органов, рассматриваемых при численном моделировании, их объем и вес.

| № пп | Наименование                  | Объем, см <sup>3</sup> | Вес, г  | Нумерация на рис. 4-7 |
|------|-------------------------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 1.   | Головной мозг                 | 1470.27                | 1451    | 0                     |
| 2.   | Голова                        | 4651,88                | 4590.95 | 1                     |
| 3.   | Сердце                        |                        |         | 2                     |
| 4.   | Левый надпочечник             | 7.85398                | 7.75109 | 3                     |
| 5.   | Кость левой руки              | 819.27                 | 1217.6  | 4                     |
| 6.   | Левая молочная железа         |                        |         | 5                     |
| 7.   | Левая ключица                 | 13.6657                | 20.3099 | 6                     |
| 8.   | Левая почка                   | 144.226                | 142.337 | 7                     |
| 9.   | Левая нога                    | 10388.2                | 10252.1 | 8                     |
| 10.  | Кость левой ноги              | 1399.74                | 2080.29 | 9                     |
| 11.  | Левое легкое                  | -                      | -       | 10                    |
| 12.  | Левый яичник                  | -                      | -       | 11                    |
| 13.  | Левая лопатка                 | 101.474                | 150.811 | 12                    |
| 14.  | Левая тестикула               | 18.7867                | 18.5406 | 13                    |
| 15.  | Толстая кишка                 | 344.257                | 339.747 | 14                    |
| 16.  | Мужские гениталии             | 229.799                | 226.788 | 15                    |
| 17.  | Поясничный отдел позвоночника | 753.957                | 1120.53 | 16                    |
| 18.  | Поджелудочная железа          | 60.9039                | 60.106  | 17                    |
| 19.  | Таз                           | 605.924                | 900.524 | 18                    |
| 20.  | Грудная клетка                | 691.818                | 1028.18 | 19                    |



|     |                             |         |         |    |
|-----|-----------------------------|---------|---------|----|
| 21. | Правый надпочечник          | 7.85398 | 7.75109 | 20 |
| 22. | Кость правой руки           | 819.456 | 1217.87 | 21 |
| 23. | Правая молочная железа      | -       | -       | 22 |
| 24. | Правая ключица              | 13.6657 | 20.3099 | 23 |
| 25. | Правая почка                | 144.226 | 142.337 | 24 |
| 26. | Правая нога                 | 10388.2 | 10252.1 | 25 |
| 27. | Кость правой ноги           | 1399.74 | 2080.29 | 26 |
| 28. | Правое легкое               | -       | -       | 27 |
| 29. | Правый яичник               | -       | -       | 28 |
| 30. | Правая лопатка              | 101.474 | 150.811 | 29 |
| 31. | Правая тестикула            | 18.7867 | 18.5406 | 30 |
| 32. | Череп                       | 843.268 | 1253.26 | 31 |
| 33. | Тонкая кишка                | 1019.19 | 1005.84 | 32 |
| 34. | Селезенка                   | 175.929 | 173.625 | 33 |
| 35. | Желудок                     | 402.124 | 396.856 | 34 |
| 36. | Тимус (вилочковая железа)   | 25.1327 | 24.8035 | 35 |
| 37. | Щитовидная железа           | -       | -       | 36 |
| 38. | Торс                        | 43958.5 | 43382.6 | 37 |
| 39. | Верхняя часть толстой кишки | 435.068 | 429.368 | 38 |
| 40. | Верхний отдел позвоночника  | 126.458 | 187.942 | 39 |
| 41. | Мочевой пузырь              | 45.9494 | 45.3474 | 40 |

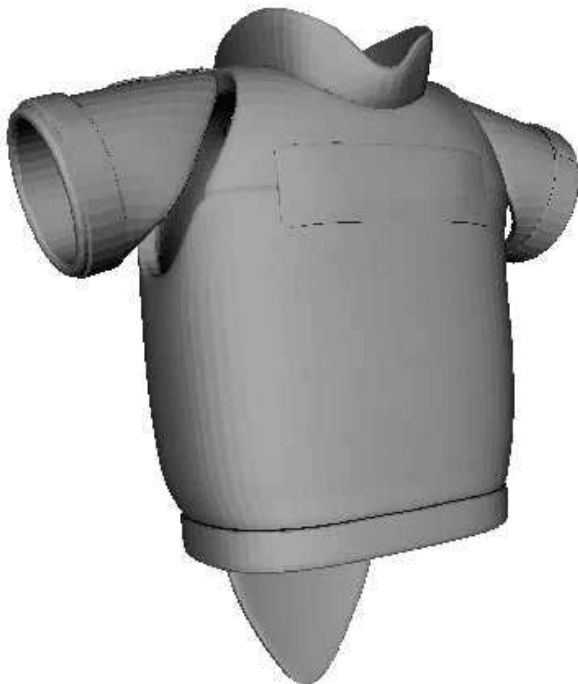


Рис. 2 – Эскиз радиационно-защитной одежды.

Таблица 2 – Состав материала радиационно-защитной одежды

| № пп | Химический элемент | Содержание, % |
|------|--------------------|---------------|
| 1.   | Кислород           | 15,65         |
| 2.   | Кремний            | 8,09          |
| 3.   | Титан              | 0,81          |
| 4.   | Мышьяк             | 0,26          |
| 5.   | Свинец             | 75,19         |

### Результаты

Результаты расчета эффективности снижения поглощенной энергии органами человека при использовании радиационно-защитной одежды, представленной на рис. 2, приведены на рис. 3-6. Расчеты производились при помощи программного комплекса GEANT4 [4, 5]. Полученные численные результаты обрабатывались в программном комплексе ROOT [6]. На графиках зависимостей справа даны нумерация органов фантома, соответствующая табл. 1 (крайний правый столбец). Поглощенная доза рассчитывалась в соответствии с методом предложенным в [7].

### Обсуждение результатов

С повышением энергии гамма-квантов эффективность радиационно-защитных свойств промоделированного костюма снижается. В некоторых случаях (когда моделируемый орган может выходить за пределы радиационно-защитного костюма) поглощенная энергия в случае применения радиационно-защитного костюма может превышать для случаев, при которых костюм отсутствует. Это происходит по следующей причине: с ростом энергии гамма-квантов растет число вторичных электронов (явление фотоэффекта), что приводит к превышению поглощенной энергии органами человека в радиационно-защитной одежде, чем без одежды. Такое явление происходит, например, для следующих органов: головной мозг, левая и правая ноги, кость левой и правой ноги. Из графиков зависимостей пока необъяснимым остается вид графика для левого и правого надпочечника (органы №№ 3 и 20). Объяснение такого поведения будет дальнейшей темой исследования.

### Выводы

В работе показана возможность применения современных методов исследований радиационных технологий, а именно проведение численных экспериментов для определения эффективности радиационно-защитной одежды [8-10]. Такие методы существенно снижают как временные, так и финансовые затраты.

Предложенные радиационно-защитный костюм

и радиационно-защитный материал показали свою эффективность и могут применяться для защиты организма человека от ионизирующего излучения.

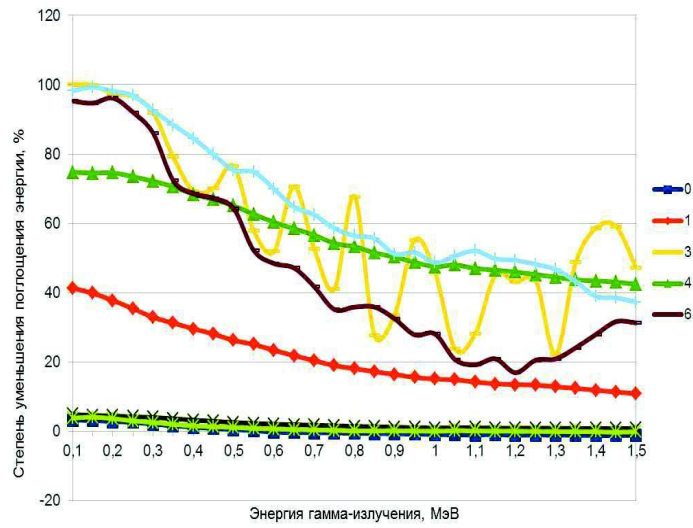


Рис. 3 – Зависимость степени уменьшения поглощения энергии гамма-излучения органами человека от энергии

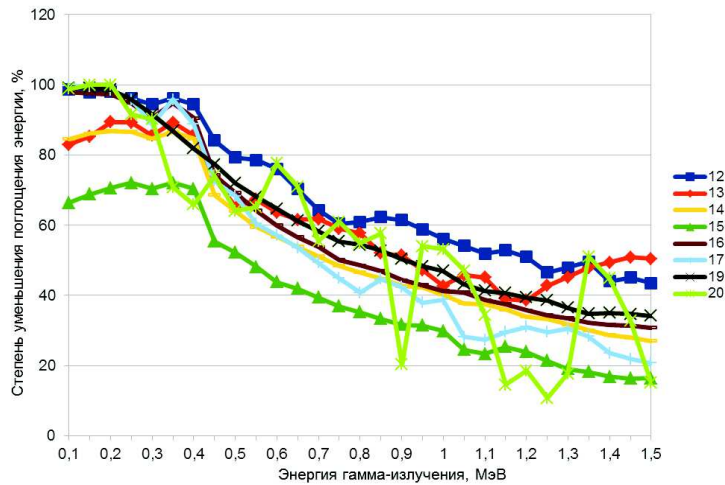


Рис. 4 – Зависимость степени уменьшения поглощения энергии гамма-излучения органами человека от энергии

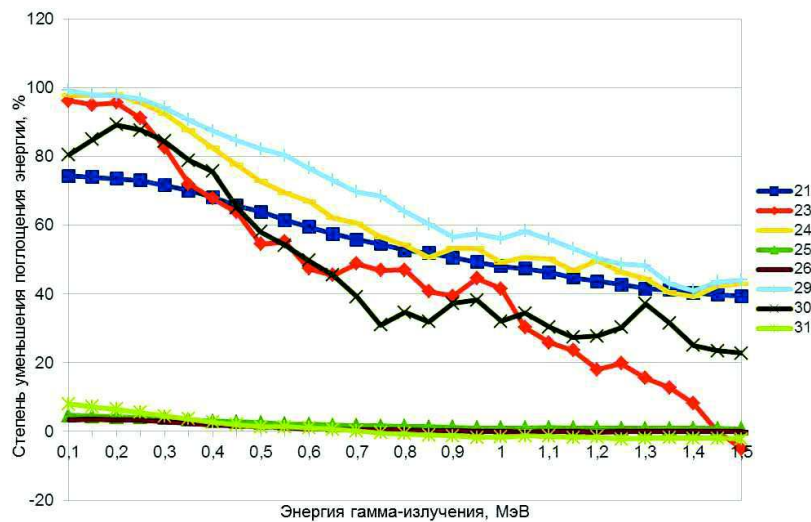


Рис. 5 – Зависимость степени уменьшения поглощения энергии гамма-излучения органами человека от энергии

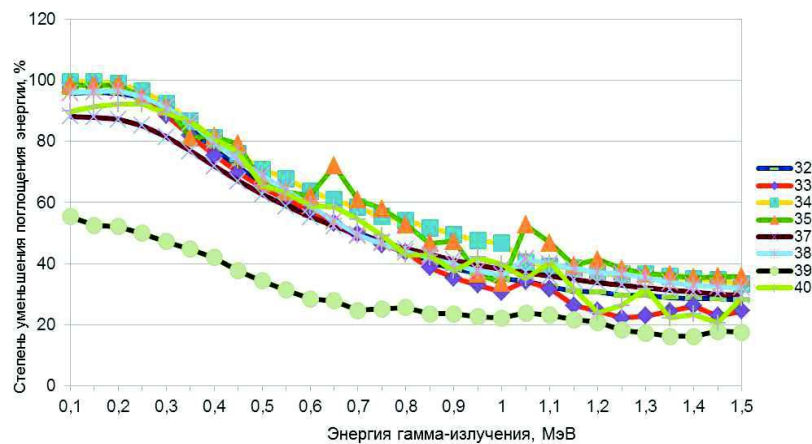


Рис. 6 – Зависимость степени уменьшения поглощения энергии гамма-излучения органами человека от энергии

### Список литературы

- 1 **Трищ, Р. М.** Радиационно-защитный материал : пат. 94166 Украина, МПК G21F 1/00 / **Р. М. Трищ, В. В. Моргунов, Н. В. Диденко, М. В. Денисенко.** / заявл. 15.08.2014 ; опубл. 27.10.2014, бюл. № 20. – 4 с.
- 2 **Моргунов, В. В.** Выбор и использование математических методов для определения технологических параметров радиационно-защитных материалов / **В. В. Моргунов, Н. В. Диденко, Р. М. Трищ** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 56-61. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.08.
- 3 **Snyder, W. S.** Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom / **W. S. Snyder et al.** // *J. Nucl. Med. Suppl.* – 1969. – No. 3. – P. 5-52.
- 4 **Allison, J.** Geant4 developments and applications / **J. Allison, K. Amako, J. E. A. Apostolakis, H. A. A. H. Araujo, P. A. Dubois, M. A. A. M. Asai, G. A. P. Cirrone** // *Nuclear Science, IEEE Transactions on.* – 2006. – No 53(1). – 270-278. – doi:10.1109/TNS.2006.869826.
- 5 **Agostinelli, S.** Geant4—a simulation toolkit / **S. Agostinelli, J. Allison, K. A. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, F. Behner** // *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* – 2003. – No 506(3). – P. 250-303. – doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- 6 **Antcheva I.** ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization / **I. Antcheva, et al.** // *Computer Physics Communications.* – 2009. – No 180(12). – P. 2499-2512. – doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005
- 7 **Моргунов, В. В.** Метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения / **В. В. Моргунов, Р. М. Трищ, Н. В. Диденко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 101-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.
- 8 **Goorley, J. T.** Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. / **J. T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. J. Cox, J. Hendricks** // *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934.* – 2013. – № 1. – P. 1-42. – doi:10.2172/1086758.
- 9 **Battistoni, G.** The FLUKA code: Description and benchmarking / **G. Battistoni, F. Cerutti, A. Fasso, A. Ferrari, S. Muraro, J. Ranft, P. R. Sala** // *In Hadronic Shower Simulation Workshop(AIP Conference Proceedings).* – 2007. – Vol. 896. – P. 31-49. – doi:10.1063/1.2720455.
- 10 **Colonna, N.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP / **N. Colonna, S. Altieri** // *Health physics.* – 2002. – № 82(6). – P. 840-846.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Trishch, R., Morgunov, V., Didenko, N., Denisenko, M.** Radiation-protective material: patent 94166 Ukraine, МПК G21F 1/00 / 27.10.2014, № 20. - 4 p.
- 2 **Morgunov V., Didenko N., Trishch R.** Choice and use of mathematical methods to determine the technological parameters of radiation-shielding materials. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", – 2016. – 12 (1184). – P. 56-61. – doi:10.20998/2413- 4295.2016.12.08.
- 3 **Snyder, W. S., et al.** MIRD Pamphlet No. 5 Revised, Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. *J. Nucl. Med. Suppl.* 1969, 3, 5-52.
- 4 **Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. E. A., Araujo, H. A. A. H., Dubois, P. A., Asai, M. A. A. M., Cirrone, G. A. P.** Geant4 developments and applications. *Nuclear Science, IEEE Transactions on,* 2006, 53(1), 270-278, doi:10.1109/TNS.2006.869826.
- 5 **Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Behner, F.** Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,* 2003, 506(3), 250-303, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- 6 **Antcheva, I., et al.** ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications.* 2009, 180(12), 2499-2512, doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005.
- 7 **Morgunov, V., Trishch, R., Didenko, N.** Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed

- (equivalent) dose rate of the ionizing radiation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 101-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.
- 8 **Goorley, J. T., James, M., Booth, T., Brown, F., Bull, J. Cox, L. J. Hendricks, J.** Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934.* 2013, **1**, 1-42, doi:10.2172/1086758.
- 9 **Battistoni, G., Cerutti, F., Fasso, A., Ferrari, A., Muraro, S., Ranft, J., Sala, P. R.** The FLUKA code: Description and benchmarking. *In Hadronic Shower Simulation Workshop (AIP Conference Proceedings)*, 2007, **896**, 31-49, doi:10.1063/1.2720455.
- 10 **Colonna, N., Altieri, S.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP. *Health physics.* 2002, **82**(6), 840-846.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Моргунов Владимир Викторович** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры физики, теоретической и общей электротехники; г. Харьков, Украина; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

**Volodymyr Morgunov** – Ph. D., Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

**Диденко Наталья Викторовна** – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ассистент кафедры метрологии и БЖД, г. Харьков, Украина; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

**Natalya Didenko** – Assistant lecturer, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

**Триш Роман Михайлович** – доктор технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, профессор кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: trich\_@ukr.net.

**Roman Trishch** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: trich\_@ukr.net.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Моргунов, В. В.** Численный расчет эффективности радиационной защитной одежды при помощи метода Монте-Карло / **В. В. Моргунов, Н. В. Диденко, Р. М. Триш** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 119-124. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.18.

*Please cite this article as:*

**Morgunov, V., Didenko, N., Trishch, R.** Numerical calculation of radiation protective clothing efficiency by using Monte Carlo method // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 119-124, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.18.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Моргунов, В. В.** Чисельний розрахунок ефективності радіаційної захисного одягу за допомогою методу Монте-Карло / **В. В. Моргунов, Н. В. Діденко, Р. М. Триш** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 119-124. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.18.

**АНОТАЦІЯ** У статті наведено результати чисельних експериментів з моделювання поглинання енергії гамма-випромінювання з/без використання запропонованих радіаційно-захисного костюма і радіаційно-захисного матеріалу (свинцеве скло у вигляді мікросфер). Запропонований метод чисельних експериментів призводить до зниження людських, часових та фінансових ресурсів. При проведенні чисельних експериментів використовувався програмний комплекс GEANT4. Отримані результати дозволяють розраховувати ефективність радіаційно-захисного одягу.

**Ключові слова:** чисельний експеримент, радіаційно-захисний одяг, гамма-випромінювання, GEANT4.

*Поступила (received) 14.06.2016*

## АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ ПАРАМЕТРІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТАЛІВ ТА ПОЛІМЕРІВ В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Г. І. ХІМІЧЕВА, В. В. КУРИЛЯК\*

Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, Київський національний університет технологій і дизайну, Київ, УКРАЇНА

\*email: valentina.kuryliak@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Практично досліджений процес поведінки параметрів матеріалів в умовах високошвидкісного навантаження. Встановлено, що міцність сферопластику визначається геометричними параметрами і щільністю, а процес руйнування показує пряму залежність між довжиною тріщини і амплітудою при різних імпульсах навантаження. Експериментально доведено, що в залежності від швидкості поширення тріщини в матеріалах групи полімери можлива поява різних поверхонь руйнування: «дзеркальної», або «шорсткої», а також присутній параболічний або «чашковий» злам.

**Ключові слова:** високошвидкісне навантаження, інтелектуальні матеріали, сферопластик, процес руйнування матеріалу.

## ANALYSIS BEHAVIOUR PARAMETERS OF INTELLIGENT METALS AND POLYMERS UNDER HIGH SPEED LOADING

A. HIMICHEVA, V. KURYLYAK\*

Department of Metrology, Standardization and Certification, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Almost investigated process parameters the behavior of materials under conditions of high load. It is found that the strength spheroplastic determined density and the geometrical parameters, the process of destruction and shows a direct relationship between the crack length and the amplitude of pulses at different loads. Experimentally proved that, depending on the rate of crack propagation in the materials group polymers may appear different fracture surfaces, "mirror" or "rough", and there is a parabolic or "The cup" kink. Established that at high speeds zones with different orientation. Proved that high performance load on intelligent materials leads to a deep fracture surfaces. The roughness increases with increasing speed of the crack. At speeds above 650 km / s is observed partial fragmentation pattern. Thus, the destruction of PMMA of interest in terms of the parameters of the spread of cracks and their rate of spread. According to the theoretical relationship between the critical pressure, causing the destruction of a spherical shell, and its parameters defined strength areas, mainly its geometrical characteristics, radius and wall thickness and elastic deformation of the glass. These data create the best design features durable, plastic and other properties because it has been proved that the basis of the effect of shape memory alloys are most of the so-called thermoelastic martensitic transformation. Almost proved that the surface destruction, creating rapid crack and consists of many "reflex" zones. These zones occur in areas of origin subsidiaries micro cracks in the vicinity of the crack tip. Location, number and character of these areas depend on the speed of the crack.

**Keywords:** high-speed load, intelligent materials, spheroplastic, the process of destruction of the material.

### Вступ

До недавнього часу непружну деформацію розглядали як пластичну і вважали її незворотною. Але в ході досліджень за останні десятиліття було встановлено, що існує великий клас матеріалів в яких елементарний акт пластичності здійснюється за рахунок зворотного мартенситного перетворення, так названого пружного двійникування і ряду інших процесів, котрі докорінно змінюють закономірності непружного деформування.

У цих матеріалів, зокрема, може спостерігатися повна або часткова зворотність непружної деформації з так званим ефектом пам'яті форми [1]. Існують сотні металевих матеріалів, які після значного непружного деформування здатні повністю відновлювати форму. Величина ефекту різна у різних матеріалів може досягати 100%. Сплави, що володіють цим ефектом, відносяться до числа найбільш яскравих представників матеріалів зі спеціальними властивостями, такими як:

високі звичайні механічні характеристики, опір втомі, корозійна стійкість і незвичайні властивості, такі як термомеханічна пам'ять, реактивна напруга. З великого числа сплавів з ефектом пам'яті форми найбільш перспективними для практичного застосування є сплави Ti-Ni, які називають нікелатом титану або нітінолом.

Сплави з ефектом пам'яті форми часто відносять до, так званих інтелектуальних матеріалів це дозволяє створювати принципово нові конструкції і технології в різних галузях машинобудування, авіакосмічній та ракетній техніці, приладобудуванні, енергетиці, медицині і ін. [2-3]. Отже, у ряді випадків сплави з ефектом пам'яті форми можуть бути використані для виготовлення елементів конструкцій, що зазнають в процесі експлуатації навантаження ударно-хвильового типу [4]. Тому важливо знати їх поведінку при ударному навантаженні. Високий тиск, який викликаний ударними хвилями, використовується для вивчення оборотних фазових перетворень, таких як:

мартенситні перетворення стали, фазові перетворення графіту в алмаз. Ці перетворення є прикладом структурних фазових змін з вихідного стану низької щільності в кінцевий високо щільний стан.

Матеріали з пам'яттю форми мають досить широке коло застосування. Метал, який має здатність до повернення деформацій, можливо запрограмувати на досить складні рухи і тим самим на вчинення виконавчих функцій майже необмеженого ступеня складності. Якщо використовувати здатність металу до прояву багаторазової зворотної пам'яті форми, то можливо виготовляти трансформовані конструкції, які будуть здійснювати само розгортання і само складання, а окремі виконавчі елементи, наприклад пружини, будуть багаторазово повторювати рухи найрізноманітніших траєкторій. Очевидно, що елементи конструкцій, виготовлені з матеріалів з пам'яттю форми, зокрема з нікеліду титану, можуть в процесі експлуатації зазнавати ударно-хвильових навантажень. Тому актуальним є вивчення поведінки даних матеріалів при ударному навантаженні. Подібні дослідження дозволять спостерігати мартенситні перетворення в сплавах і зміну їх структури і властивостей. Отримані дані дозволяють створювати конструкції з найкращими міцнісними характеристиками, пластичними та іншими властивостями. В основі ефекту пам'яті форми більшості сплавів лежать, так звані термодпружні мартенситні перетворення. Відомо, що теорія мартенситних перетворень ґрунтується на уявленнях про закономірний характер перебудови кристалічної решітки і когерентності співіснуючих фаз аустеніту (А) і мартенситу (М).

Для сплавів з термодпружними мартенситними перетвореннями характерна залежність фазового складу від температури. При охолодженні матеріалу з аустенітного стану мартенсит починає утворюватися з деякою температури  $M_n$ . І при подальшому охолодженні кількість мартенситної фази збільшується, і повне перетворення аустеніту в мартенсит закінчується при температурі  $M_s$ . нижче цієї температури термодинамічно стійкою залишається тільки мартенситна фаза. При нагріванні і перетворенні мартенситу в аустеніт, даний процес починається з деякої температури  $A_n$  і повністю закінчується при температурі  $A_s$ . А при повному термоциклюванні виходить гістерезисна петля, оскільки ширина гістерезисної петлі по температурній шкалі  $A_s-M_n$  або  $A_n-M_s$  може бути різною, то для різних матеріалів: широкої або вузької. При наявності механічної напруги, температури  $M_n$ ,  $M_s$ ,  $A_n$  і  $A_s$  можуть зміщуватися в сторону більш високих температур, і в цьому випадку їх позначають як  $M_n^σ$ ,  $M_s^σ$ ,  $A_n^σ$ ,  $A_s^σ$  [5].

Важливо відзначити, що при термодпружних мартенситних перетвореннях (в відміню від звичайних мартенситних перетворень, наприклад в сталях) міжфазні гранці між А і М зберігають когерентність і є легко рухливими. При охолодженні (пряме перетворення) в інтервалі температур (М- $M_s$ ) зароджуються і ростуть кристали мартенситу, а при нагріванні (зворотне перетворення) в інтервалі температур (А- $A_s$ ) кристали мартенситу зникають (перетворюються в аустеніт) в зворотній послідовності. Цей процес зображено на рис. 1.

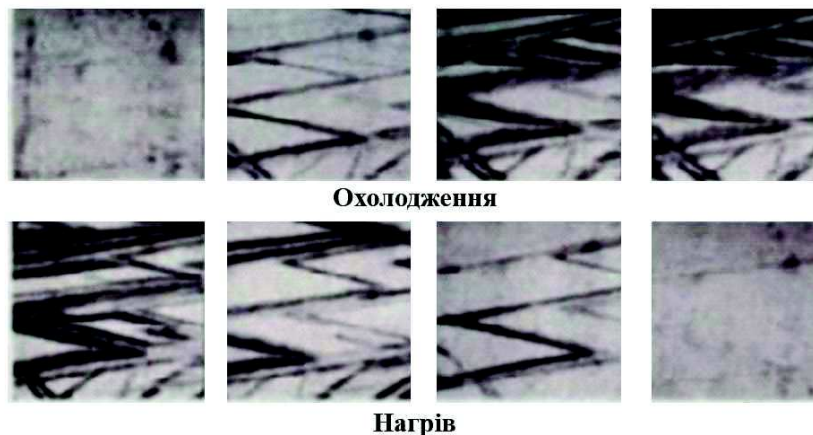


Рис. 1 – Ріст і зникнення кристалів мартенситу при охолодженні і нагріві

У разі наявності в матеріалі орієнтованих напруг (наприклад, дії зовнішнього навантаження) мартенситні пластини набувають переважного орієнтування, і локальні зсувні деформації призводять до макроскопічних змін форми зразка. В процесі зворотного перетворення (М-А) перебудова решітки відбувається за принципом «Точно назад», при цьому локальні зсувні деформації зникають і, отже, усувається макроскопічна зміна форми. Зовнішній

прояв такої поведінки матеріалу інтерпретується як ефект пам'яті форми.

Перебіг фазового перетворення і поява структури мартенситу може бути викликана дією ударних хвиль, а перебіг мартенситного перетворення і ефекту пам'яті форми в сплавах Ti-Ni досліджувався в роботі [6]. Пластини нікелідатитану (Ti-50.5 ат.% Ni) розмірами 80-60-2,2 мм були піддані навантаженню ударними хвилями. Пластини були отримані прокатом

в аустенітному стані при високих температурах, температура кінця прокатки була нижче 500° С. Було використано два способи навантаження з різними амплітудами тиску. Змінна ударна хвиля з тиском 10 ГПа створювалася вибухом пластичної вибухової речовини (ВР). Плоска ударна хвиля з тиском 50 ГПа створювалася за допомогою металевої пластини. Послідовність вимірювань полягала в наступному: кожен зразок спочатку охолоджували для завершення мартенситних перетворень, потім нагрівали вище кінця зворотного перетворення, потім охолоджували до кімнатної температури. Ці вимірювання становили перший цикл мартенситних перетворень. Такі ж вимірювання, зроблені повторно, становили другий цикл перетворень [6].

При ударно-хвильовому навантаженні діють зовнішні фактори (напруги і деформації), що викликають відбір орієнтувань при мартенситних перетвореннях. Ці фактори долають вплив частинок і дислокацій, змінюючи тип пам'яті від аустенітної до мартенситної. Однак носії аустенітної пам'яті зберігаються в структурі утвореного мартенситу. Після перетворення при нагріванні зникає набір орієнтувань мартенситу, що виникли при навантаженні, і відтворюється текстура аустеніту. Наступні мартенситні перетворення відбуваються з відбором орієнтувань, який диктується збереженими внутрішніми факторами. Аустенітна пам'ять і відповідна текстура мартенситу відтворюються [7].

Мартенситне перетворення впливає на межу текучості матеріалу при ударно-хвильовому деформації і його зростання з нагріванням [6]. У роботі [8] вивчення впливу інтенсивної деформації на властивості міцності матеріалу здійснювалося шляхом проведення експериментів з крупнозернистими зразками сплаву TiNi і субмікросталічними зразками сплаву TiNi. Експерименти проводилися в інтервалі температур зразків від мінус 80 °С до плюс 140 °С, тобто температурний діапазон випробувань вклався області стійкості аустенітної і мартенситної фаз і області термопружних мартенситних перетворень.

Результати вимірювань підтверджують вплив перетворення на межі плинності матеріалу в субмікросекундному діапазоні тривалостей навантаження. Межа пружності при ударному стисненні при кімнатній температурі виявляється близькою до нуля, при 80 °С зростає до 2,5 ГПа, зниження ж температури до мінус 60 °С не призводить до суттєвих змін меж пружності.

Виміряні профілі швидкості вільної поверхні зображені на рис. 2 і показують, що при кімнатній і низьких температурах відкольні руйнування завершуються за час близько 150 нс, а при підвищених температурах відколюється пластина, яка зберігає досить міцний зв'язок з іншою частиною зразка. Крім того, зменшення величини зерна шляхом пластичної деформації призводить до зростання усіх міцностей матеріалу в усьому вивченому інтервалі температур.

Таким чином, ударні впливи на сплави з пам'яттю форми викликають мартенситні перетворення, які називаються ударними. Поведінка пластично-деформованих матеріалів, в цілому, мало відрізняється від поведінки не деформованих матеріалів при ударному навантаженні.

Отже, на параметри матеріалів впливає температура проведення експериментів: нормальна і низька температури збільшують швидкість мартенситного перетворення (зменшують в'язкість); підвищена температура збільшує межу пружності; відкольна міцність високотемпературної фази залишається практично незмінною; при кімнатній і зниженій температурах міцність деформованого матеріалу приблизно на 15% нижче [8].

Як відомо, полімерами називають речовини, макромолекули яких складаються з численних елементарних ланок (мономерів) однакової структури. Молекулярна маса їх становить від 5000 до 1000 000.

При таких великих розмірах макромолекул властивості речовин визначаються не тільки хімічними складовими цих молекул, але і їх взаємним розташуванням і будовою. Макромолекули полімеру являють собою ланцюжки, що складаються з окремих ланок. Поперечний переріз ланцюга кілька ангстрем, а довжина кілька тисяч ангстрем, тому макромолекулам полімеру властива гнучкість (яка обмежена розміром сегментів – жорстких ділянок, що складаються з декількох ланок). Гнучкість макромолекул є однією з відмінних рис полімерів.

Особливості будови полімерів надають великий вплив на їх фізико-механічні та хімічні властивості. Внаслідок високої молекулярної маси вони не здатні переходити в газоподібний стан, при нагріванні утворювати низко в'язкі рідини, а деякі, що володіють термостабільною просторовою структурою, навіть розм'якшуються. З підвищенням молекулярної маси зменшується розчинність. При молекулярній масі (300 - 400)\*10<sup>3</sup> і низькій полярності полімери розчинні в розчинниках, процес протікає повільно: через стадію набухання з появою дуже в'язких розчинів. Якщо молекулярна маса дуже велика або присутні високо полярні групи, то полімер стає нерозчинним ні в одному з органічних розчинників [8].

Полімерні матеріали є в'язко пружні та твердими тілами. Схильність останніх до непружної і пластичного деформації убуває, коли вони випробовуються при високих швидкостях завантаження. Більш низька деформованість викликає у в'язкому або високо еластичному полімері крихке руйнування. Опір полімерів ударному навантаженню має технічне значення, яке ілюструється такими прикладами:

1. Ілюмінатори літака повинні витримувати удари твердих частинок або крапель дощу;
2. Захисні покриття високовольтних перемикачів повинні витримувати удари металевих осколків;

3. Труби не повинні пошкоджуватися при випадковому ударі і т.д.

У даній роботі розглянуті особливості поведінки при ударі двох полімерів: склоподібного поліметилметакрилату (ПММА) – оргскла і композиційного матеріалу – сферопластіку. Поліметилметакрилат (ПММА) низькомолекулярний формувальний (Молекулярна маса  $8 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$ ) продукт суспензійний або блокової полімеризації або ко полімеризації метилметакрилату з акрилатами. ПММА стійкий до багатьох розчинів неорганічних реагентів, включаючи розбавлені луку і кислоти, подібно звичайному полістиролу, аморфний при будь-яких умовах. Але властивості ПММА перевершують полістирол, полівінілацетат, полівінілхлорид (полістирол – дешевий термопласт, який володіє високою твердістю, але крихкий і не теплостійкий).

Одним з найбільш цінних властивостей поліметилметакрилату є його оптична прозорість і відсутність забарвлення. Поєднання оптичних властивостей з дуже високою атмосферо стійкістю робить поліметилметакрилат особливо цінним в тих випадках, коли потрібна висока прозорість виробів.

Поліметилметакрилат забарвлюється в різні яскраві кольори, причому забарвлення є світлостійкими. Наприклад, задні ліхтарі у автомобілів робляться з цього полімеру, пофарбованого в червоний і інші кольори [10]. Поліметилметакрилат володіє також хорошими механічними і термічними властивостями. Міцність на удар майже так само висока, як у спеціальних сополімерів стиролу. Теплостійкість прес-порошків з теплостійких сортів поліметилметакрилату перевищує  $90^\circ$ . Цей полімер володіє досить хорошими діелектричними властивостями. Поліметилметакрилат дуже легко переробляється, а температура, необхідна для його пресування, лише трохи перевищує температуру пресування полістиролу.

Поліметилметакрилат має меншу схильність до розтріскування, ніж полістирол. Застосування поліметилметакрилату для виготовлення оптичних виробів обмежується його низькою порівняно зі склом стійкістю до стирання. Спроби підвищити стійкість полімеру до дряпання (збільшити його поверхневу твердість) не дали бажаних результатів, так як у всіх випадках спостерігалось погіршення інших властивостей, наприклад ударної міцності [11].

Технічний продукт поліметилметакрилат (ПММА), відомий під назвою органічне скло створюється з ПММА і не тільки, оскільки це листовий матеріал, який отримують шляхом полімеризації метилметакрилату та мономерів. В залежності від конкретного призначення у суміш матеріалу вводять пластифікатори, барвники, замутнювачі і стабілізатори. Оскільки органічне скло використовують у широкому спектрі, це в свою чергу зумовлює інтерес до вивчення його поведінки в умовах різного ударного типу.

Так, при ударному руйнуванні ПММА в роботі [12] сумісно із співавторами було встановлено, що при швидкості удару 2000 м/с відбувається руйнування, а саме відокремлення великого центрального уламку, розміри якого у 3 рази перевищують розміри ударнику, а також велика кількість дрібних уламків. В результаті проведеного експерименту було встановлено, що при розмірах ударника  $100 \times 100$  і товщиною 38 мм, швидкість удару досягала від 800 до 2500 м/с і спостерігалися значні руйнування. А при швидкості меншій за 800 м/с не спостерігалось суттєвого руйнування мішені, але матеріал ударнику починав розтікатися по поверхні мішені. При швидкості удару 2000 м/с діаметр зони руйнування складав від 40 до 45 мм з глибиною 10 мм. Розміри центрального уламку були рівні 27 мм з висотою 9 мм. До того ж зона руйнування яка відповідає за формування центрального уламку утворилася зразу ж після зіткнення. Через 2 мкс з'явилися розтягуючі напруження на глибині 8 мм, до того ж зона просувалася вниз і збільшувалася в об'ємі. Сам процес руйнування завершується повним відділенням уламку через 30 мкс. В роботі [13] вимірювалась інтенсивність рентгенівського променю з щільністю матеріалів, яка змінювалася. А навантаження зразків ПММА висотою 10 мм з одного торця проводилось вибухом заряду вибухової речовини, такої ж форми висотою 70 мм. На рис. 1. Зображена схема експерименту.

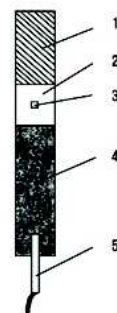


Рис. 2 – Схема постановки експерименту  
1. металічний циліндр, 2. зразок ПММА, 3. зона наведення пучка, 4. заряд ВР, 5. детонатор.

Незважаючи на значний відсоток експериментальних робіт присвячених дослідженню властивостей органічного скла, стійкий фізичний процес руйнування відсутній. Наприклад на сьогодні питання про те, які тріщини повздовжні або поперечні є визначальними при зсуві під дією хвилі руйнування. В даному випадку після удару слідує хвиля руйнування, зменшується щільність, яка рівняється розмаху уламків у хвилях розрідження і в самій хвилі ми спостерігаємо ударну хвилю з інтервалом 1,25 мкс з стисненням 0.75 мкс до моменту початку зсуву.

Особливий інтерес при навантаженні матеріалів, подібних ПММА, представляє дослідження динаміки поширення тріщин в крихкому матеріалі. Тим більше що прозорість матеріалу дуже добре дозволяє спостерігати це явище. В роботі [12]



проводився експеримент з прямокутними зразками з ПММА довжиною 141 мм висотою 66 і 86 мм і товщиною 0,6 до 1,9 мм. Експериментальна установка створювала напруги в діапазоні від 13 до 45 МПа. В ході експерименту визначалися сила, прикладена до зразка, середня швидкість тріщини і поле напружень в зразку. Поверхні руйнування зразків досліджувалися за допомогою оптичного мікроскопа. Тріщина створювалася гострим лезом на середині бічної грані зразка. В ході експерименту було встановлено два режими поширення тріщини: помірковано-прямолінійний і режим розгалуження. У першому випадку тріщина рухалася зі швидкістю до 416 м/с і сформувала гладку поверхню руйнування. У режимі розгалуження швидкість тріщини досягає 500-800 м/с і поверхня зламу має значну шорсткість.

Поверхня руйнування, створена швидкою тріщиною, складається з безлічі «дзеркальних» зон. Ці зони виникають в місцях зародження дочірніх мікро тріщин в околі вершини тріщини. Місце знаходження, число і характер розвитку цих зон залежать від швидкості тріщини. Якщо швидкість основної тріщини низька, зони формуються тільки у напрямку максимуму напруг розтягуючих, які збігаються з початковою орієнтацією тріщини, що дає освіту гладкій поверхні зламу.

При високих швидкостях ці зони мають різну орієнтацію, що призводить до глибокої поверхні руйнування. Шорсткість збільшується в міру збільшення швидкості тріщини. При швидкостях вище 650 м/с спостерігається часткова фрагментація зразка.

Таким чином, руйнування ПММА представляє інтерес з точки зору параметрів поширення тріщин і швидкості їх поширення. Експериментальні дослідження показують, що в залежності від швидкості поширення тріщини можлива поява різних поверхонь руйнування: «дзеркальної», «шорсткої», а також параболічний або «чашковий» злам.

Сферопластиком називають композиційний матеріал, що містить скляні або вуглецеві мікросфери, впроваджені в матрицю сполучного. Композиційний матеріал – це штучний матеріал, одержуваний поєднанням хімічно різномірних компонентів. Одним з компонентів є матриця (для полімерів – сполучна), іншим – зміцнені чи. Родоначальником композиційних матеріалів є армовані склопластики. Їх фізична природа, схеми армування і розрахункові особливості переносяться на композиційні полімерні матеріали [12]. Мікросфери або сферичні наповнювачі можуть бути суцільними і порожніми. Суцільні скляні мікросфери володіють багатьма якостями ідеального наповнювача: мінімальний вплив на в'язкість і протягом матриці, відсутність нерівномірного розподілу концентрації напружень навколо частинки, як для наповнювачів складної форми з гострими кутами і кутами, що зазвичай призводить до погіршення механічних властивостей наповнених матеріалів. Зазвичай суцільні мікросфери мають розміри від  $5 \cdot 10^3$  до 0,7 мм [14]. Найчастіше ці

мікросфери використовуються в якості дешевих наповнювачів або для додання спеціальних властивостей. Скляні мікросфери знаходять застосування, як наповнювачі практично для будь-яких полімерів. Вони дозволяють підвищити міцність при розтягуванні і стисненні, модуль пружності при вигині, твердість, зносостійкість, деформаційних теплостійкість, водостійкість, корозійну стійкість, електричні властивості, в'язкість руйнування. Найкращий ефект досягається при використанні сфер в поєднанні з волокном. [15].

Введення порожніх скляних мікросфер підвищує жорсткість і ударну міцність склопластиків. Порожністі мікросфери в якості наповнювача мають вельми широке коло застосування, в тому числі і в областях, де вони піддаються високим навантаженням. Порожністі мікросфери використовують в виготовленні піно заповнювачів для корпусу і палуби човнів. Такі пінопласти значно міцніші за звичайні, тому знаходять широке застосування і у виробництві глибоководних апаратів, тому що витримують гідростатичний тиск до 100 МПа. Крім того, порожністі мікросфери використовуються як наповнювачі для теплозахисних матеріалів і забезпечують зниження їх маси, підвищення тепло ізолюючої здатності і міцності при стисненні, а також у виробництві інших елементів конструкцій космічної техніки [81]. Застосування порожнистих мікросфер для виготовлення композиційних полімерних матеріалів – сферо пластиків – в подібних областях, сприяє вивченню найбільш важливих фізико-механічних характеристик мікросфер таких, як щільність і міцність. Існує ряд факторів, впливають на міцність порожніх мікросфер. У роботі [12], згідно з теоретичної залежності між величиною критичного тиску, що викликає руйнування сферичної оболонки, і її параметрами, міцність сфери визначається, головним чином, її геометричними характеристиками: радіусом і товщиною стінки, а також пружною деформацією скла (модулями Юнга і Пуассона).

$$P_{кр} = \frac{1,15 * E * (h/r^2)}{\sqrt{1 - \mu^2}}, \quad (1)$$

де,  $P_{кр}$  – величина руйнівного тиску;

$h$  - товщина стінки;

$r$  - радіус сфери;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона;

$E$  - модуль пружності скла.

Для оцінки впливу кожної складової (геометричної та хімічної) отримана залежність критичної міцності від дійсної щільності порожнистих мікросфер рис 3.

В інтервалі значень щільності 200-400 кг/м<sup>3</sup>. Найбільша межа міцності сфер змінюється практично лінійно. Крім того, міцність сфер визначається, головним чином, їх геометричними параметрами. Значення величини модуля пружності скла зростає в міру збільшення щільності мікросфер, особливо після 500-600 кг/м<sup>3</sup> [12]. Порожні скляні мікросфери є

полідисперсний матеріалом, що містять безліч частинок, що відрізняються розмірами, товщиною стінки, щільністю. Саме цим пояснюється характер кривої руйнування порожніх мікросфер (рис. 4). Вихідна дійсна щільність мікросфер дорівнює  $290 \text{ кг/м}^3$ . На рис. 4. Зображено залежність ступеня руйнування порожніх скляних мікросфер  $N_p$  від величини гідростатичного тиску  $P$  (щільність мікросфери =  $290 \text{ кг/м}^3$ ).

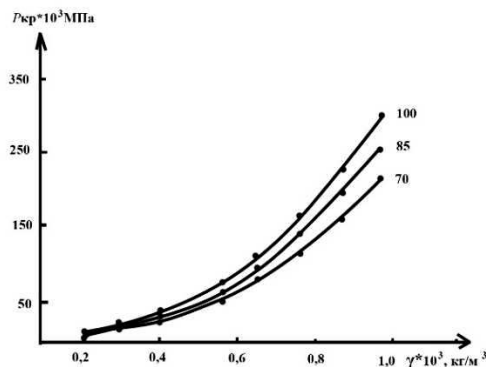


Рис. 3 – Залежність розрахункових значень міцності від щільності

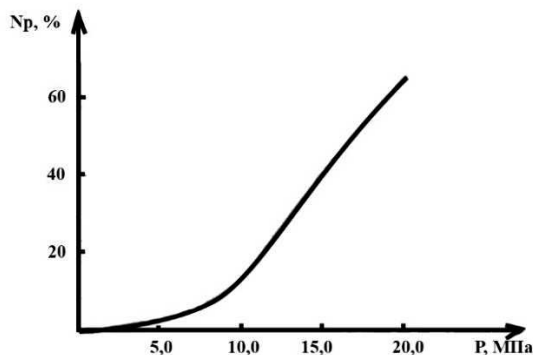


Рис. 4 – Залежність ступеня руйнування порожніх скляних мікросфер  $N_p$  від величини гідростатичного тиску  $P$

Як впливає з рівняння (1), зміна критичної міцності порожнистих сфер лінійно залежить від величини модуля пружності скла, причому зі збільшенням значень щільності ця залежність стає більш суттєвою. Для мікросфер з щільністю  $300 \text{ кг/м}^3$ , наприклад, розрахункові значення критичної міцності зі збільшенням модуля пружності від  $70 \cdot 10^3$  до  $85 \cdot 10^3$  МПа змінюються від 168 до 204 МПа [12].

### Висновки

Таким чином, вирішальним фактором, що впливає на міцність порожніх скляних мікросфер, є їх дійсна щільність, або, при умови незначного розкиду за розмірами, товщина стінки. Значення модуля пружності для обмеженої області практичних скляних не робить істотного впливу на міцність порожніх мікросфер, особливо в області значень дійсної

щільності  $200 - 400 \text{ кг/м}^3$ . Крім того, у багатьох випадках виявляється можливим досить точно визначення енергетичного стану зразка в момент руйнування. при порогових навантаженнях руйнування відбувається із затримкою, близькою до інкубаційного часу руйнування. При цьому час старту тріщини виявляється більшим за час дії зовнішнього імпульсу тиску. при навантаженні зразків імпульсами тривалістю менше інкубаційного періоду руйнування. Вся енергія зовнішнього впливу переходить в пружну і кінетичну енергію матеріалу, і процес просування тріщини визначається в подальшому величиною цієї внутрішньої енергії. З огляду на сферу застосування композиційних матеріалів, таких як сферопластик, зокрема в плавучих засобах глибоководних апаратів важливо не тільки, знати їх поведінку при навантаженні.

Такі матеріали мають хороші конструкційні і діелектричні властивості і виявляються досить міцними по відношенню до ударних навантажень і мають незначну вагу. Як видно, міцність сферопластику визначається геометричними параметрами і щільністю. А руйнування сферопластику показує пряму залежність між довжиною тріщини і амплітудою при різних імпульсах навантаження.

### Список літератури

1. **Ооцука, К.** Сплавы с эффектом памяти формы / **К. Ооцука** и др. под ред. Х. Фунакубо. – М. : Металлургия. – 1990. – 224 с.
2. **Курдюмов, Г. В.** О природе бездиффузных мартенситных превращений / **Г. В. Курдюмов** // ДАН СССР. – 1948. – Т. 60. – № 9. – С. 1543-1546.
3. **Курдюмов, Г. В.** О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях / **Г. В. Курдюмов, Л. Г. Хандрос** // ДАН СССР. – 1948. – Т. 60. № 2. – С. 211-220.
4. **Otsuka, Ed. K.** Shape memory materials / **Ed. K. Otsuka, C. M. Wayman** // *Cam-bridge University Press*, 1999. – 284 p.
5. **Barbarino, S.** A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft / **S. Barbarino, E. I. Saavedra Flores, R. M. Ajaj, I. Dayyani, M. I. Friswell** // *Smart Mater. Struct.* – 2014. – № 23(6). – P. 1-19. doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
6. **Greninger, A. B.** Strain transformation in metastable beta copper–zinc and beta copper–tin alloys / **A. B. Greninger, V. G. Mooradian** // *Trans. AIME.* – 1938. – № 128. – P. 68-337.
7. **Chang, L. C.** Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals – the gold–cadmium beta phase / **L. C. Chang, T. A. Read** // *Trans. AIME.* – 1951. – № 189. – P. 47-52.
8. **Buehler, W. J.** Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi / **W. J. Buehler, J. V. Gilfrich, R. C. Wiley** // *Appl. Phys.* – 1963. – № 34. – P. 1475
9. **Jani, J. M.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities / **J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson** // *Materials & Design.* – 2014. – № 56. – P. 1078-1113. – doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.

10. **Мишак, В. Д.** Епоксидні наноккомпозити. Структура та властивості / **В. Д. Мишак, В. В. Семиног, Ю. П. Гомза** та ін. // *Полімер. журн.* – 2008. – Т. 30. № 2. – С. 146-153.
11. **Помагайло, А. Д.** Наночастиці металлов в полімерах / **А. Д. Помагайло, А. С. Розенберг, И. Е Уфлянд** // М.: Химия. – 2000.
12. **Веселовский, Р. А.** Формирование органоминеральной композиции на основе полиизоцианата и жидкого стекла / **Р. А. Веселовский, С. С. Ищенко, Т. И. Новикова** // *Укр. хім. журн.* – 1988. – Т. 54. № 3. – С. 315-319.
13. **Bronstein, L. M.** Design of organic-inorganic solid polymer electrolytes: synthesis, structure and properties / **L. M. Bronstein, R. L. Karlinsey, K. Ritter** et al. // *J. Mater. Chem.* – 2004. – Vol. 14. – P. 1812-1820. – doi:10.1039/B401826E.
14. **Лебедев, Е. В.** Полимерные органосиликатные системы / **Е. В. Лебедев, С. С. Ищенко, А. Б. Придатко** и др. // *Композиц. полимер. материалы.* – 1999. – №21(1). – С. 3-12
15. **Гуль, В. Е.** Структура и механические свойства полимеров / **В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев** // М.: Высшая школа. – 1972.
- applications to morphing aircraft. *Smart Mater. Struct.*, 2014, **23** (6), 1-19, doi:10.1088/0964-1726/23/6/063001.
6. **Greninger, A. B., Mooradian V. G.** Strain transformation in metastable beta copper–zinc and beta copper–tin alloys. *Trans. AIME*, 1938, **128**, 68-337.
7. **Chang, L. C., Read, T. A.** Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals – the gold–cadmium beta phase. *Trans. AIME*, 1951, **189**, 47-52.
8. **Buehler, W. J., Gilfrich, J. V., Wiley, R. C.** Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Appl. Phys.*, 1963, **34**, 1475 p.
9. **Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A.** A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Materials & Design*, 2014, **56**, 1078-1113, doi:10.1016/j.matdes.2013.11.084.
10. **Mishak, V. D., Seminog, V. V., Gomza, Yu. P.** та In. Epoksidni nanokompoziti. *Struktura ta vlastivostI.* 2008, **30**(2), 146-153.
11. **Pomagaylo, A. D.** Nanochastitsyi metallov v polimerah. Moscow: Himiya, 2000.
12. **Veselovskiy, R. A., Ischenko, S. S., Novikova, T. I.** Formirovanie organomineralnoy kompozitsii na osnove poliiizotsianata i zhidkogo stekla. *Ukr. hIm. zhurn.* 1988, **54**(3), 315-319.
13. **Bronstein, L. M., Karlinsey, R. L., Ritter, K.** et al. Design of organic-inorganic solid polymer electrolytes: synthesis, structure and properties. *J. Mater. Chem.* 2004, **14**, 1812-1820, doi:10.1039/B401826E.
14. **Lebedev, E. V., Ischenko, S. S., Pridatko, A. B.** i dr. Polimernyye organosilikatnyie sistemyi. *Kompozits. polimer. materialy.* 1999, **21**(1), 3-12.
15. **Gul, V. E., Kuleznev, V. N.** Структура i mehanicheskie svoystva polimerov. Moscow: Vysshaya shkola, 1972.

#### References (transliterated)

1. **Ootsuka, K.** [and others] Alloys with shape memory effect. ed. by H. Funakubo. Moscow: Metallurgy, 1990, 224 p.
2. **Kurdyumov, G. C.** On the nature of bitdefender martensitic transformations. *DAN SSSR*, 1948, **60** (9), 1543-1546.
3. **Kurdyumov, G. C., Andros, L.** Thermoelastic equilibrium when the martensite transformation. *DAN SSSR*, 1948, **60**(2), 211-220.
4. **Otsuka, Ed. K., Wayman, C. M.** Shape memory materials. Cam-bridge University Press, 1999, 284 p.
5. **Barbarino, S., Saavedra Flores E. I., Ajaj R. M., Dayyani I., Friswell, M. I.** A review on shape memory alloys with

#### Відомості про авторів (About authors)

**Хімичева Ганна Іванівна** – доктор технічних наук, професор, заступник завідуючого кафедри метрології, стандартизації та сертифікації, Київського національного університету технологій і дизайну, Київ, Україна, E-mail: Himicheva.knugd@gmail.com, тел.: 066-29-913-64

**Himicheva Anna** – Professor, Doctor of Technical Science, Deputy Head of Department, Department of Metrology, Standardization and Certification, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine, E-mail: Himicheva.knugd@gmail.com, Tel.: 066-29-913-64

**Куриляк Валентина Василівна** – аспірантка кафедри метрології, стандартизації та сертифікації, Київського національного університету технологій і дизайну, Київ, Україна, E-mail: valentina.kuryliak@gmail.com, тел.: 063-29-805-39

**Kurylyak Valentina** – Postgraduate student, Department of Metrology, Standardization and Certification, Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, Ukraine, 01011, E-mail: valentina.kuryliak@gmail.com, tel.: 063-29-805-39

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

**Хімичева, Г. І.** Аналіз поведінки параметрів інтелектуальних металів та полімерів в умовах високошвидкісного навантаження / **Г. І. Хімичева, В. В. Куриляк** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 125-131. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.19.

Please cite this article as:

**Himicheva, A., Kurylyak, V.** Analysis behaviour parametrs of intelligent metals and polymers under high speed loading. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 125-131, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.19.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Химичева, А. И.** Анализ поведения параметров интеллектуальных металлов и полимеров в условиях высокоскоростного нагружения / **А. И. Химичева, В. В. Куриляк** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 125-132. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.19.

**АННОТАЦІЯ** Практически исследован процесс поведения параметров материалов в условиях высокоскоростной нагрузки. Установлено, что прочность сферопластика определяется геометрическими параметрами и плотностью, а процесс разрушения показывает прямую зависимость между длиной трещины и амплитудой при различных импульсах нагрузки. Экспериментально доказано, что в зависимости от скорости распространения трещины в материалах группы полимеры возможно появление различных поверхностей разрушения: «зеркальной», или «шероховатой», а также присутствует параболический или «чашечный» излом.

**Ключевые слова:** высокоскоростная нагрузка, интеллектуальные материалы, сферопластик, процесс разрушения материала.

Надійшла (received) 04.07.2016

УДК 621.881

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.20

**АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ ТА ПЕРЕМІЩЕНЬ  
ТОНКОСТІННОЇ ВТУЛКИ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАТИСКНОГО ПАТРОНА****Т. А. ЦВИД\*, Ю. М. КУЗНЕЦОВ***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, УКРАЇНА  
\*email: tsvyd1003@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ.** Наголошено, що затискні патрони виконують одну з важливих функцій – забезпечення необхідної сили затиску деталі або інструмента в процесі високошвидкісної обробки на верстатах з ЧПУ. Описаний принцип роботи інструментального затискного патрона (ІЗП) з гідропластом, створеного з використанням генетико-морфологічного підходу і виконаний теоретичний аналіз внутрішніх напружень та переміщень основного затискного елемента – циліндричної тонкостінної втулки. Запропоновані і теоретично обґрунтовані рекомендації по вибору конструктивних параметрів циліндричної тонкостінної втулки.

**Ключові слова:** інструментальний затискний патрон з гідропластом, циліндрична тонкостінна втулка, генетико-морфологічний підхід, внутрішні напруження, пружні переміщення.

**ANALYTICAL DETERMINATION OF INTERNAL STRESS AND DISPLACED  
THIN-WALLED PLUG****T. TSVYD\*, Y. KUZNETSOV***National Technical University of Ukraine "Kiev's Polytechnic Institute", Kiev, UKRAINE*

**ABSTRACT.** At first blush, the goal in designing and building toolholders is simple: Design a device that can hold a tool with enough rigidity for its particular application and so that it can maintain accuracy in a wide variety of machining conditions. More needs to be done. make it easy to use so change-outs are quick and accurate. And help it extend tool life and improve finish quality if you can. Described principle of work of the instrumental clamping chuck (ICC) with gidroplast, created with the use of genetic-morphological the approach and the executed theoretical analysis of internal stress, and moving of basic clamping element - cylindrical thin-walled plug. For the theoretical analysis compiled the normal scheme of loading of the cylindrical thin-walled plug in longitudinal and cross sections elastic a place with three zones of variable length and thickness, and one thickness on all length of a place for the purpose of search of rational design construction parameters. For the solution of a task have been used the formulas to Lama and rejected infinitesimal quantities of high orders in comparison with other. Recommendations about the choice of design data of the cylindrical thin-walled plug are offered and theoretically proved – 1) tension at all points walled sleeve - negative, corresponding to compression; 2) accepted - thick-walled cylindrical sleeve  $T1 = 0.52 \text{ mm}$ ; 3) use of material for plug - Steel 40X GOST 8731-87 with heat treatment, hardening and heating microwave  $h 1,8 \dots 2,2$ ; supply - HRC 35  $\dots 40$ .

**Keywords** instrumental clamping chuck with gidroplast, cylindrical thin-walled plug, genetic-morphological the approach, internal stress, elastic movement

**Вступ**

Однією з сучасних тенденцій розвитку машинобудування є високопродуктивна (High Product Cutting) за рахунок застосування інструментальних матеріалів, що дозволяє при високій стійкості інструменту забезпечити високошвидкісну обробку (High Speed Cutting) для лезвийної обробки до 30 м/с деталей простої форми і з великими подачами складної форми. Високошвидкісна обробка особливо широко застосовується на підприємствах автомобільної, авіакосмічної та верстатобудівної промисловості. Для високопродуктивної і високошвидкісної обробки необхідно створення нових конструкцій затискних механізмів і пошук нових способів затиску, наприклад, високошвидкісних патронів з компенсацією відцентрових сил [5, 11, 13].

Для рівномірного затиску деталей в патроні застосовують гідравлічні камери, заповнені мінеральним маслом або рідкою пластичною масою – гідропластом [1]. Принцип дії такого механізму заснований на використанні закону Паскаля, згідно з яким тиск на рідину, вміщену в замкнутій посудині, передається одночасно на всі боки з однаковою силою. Таким чином, якщо в замкнуту порожнину затискного патрона помістити гідропласт і впливати на нього зовнішньою силою, то можна отримати гідростатичний тиск, який буде рівномірно розподілятися на всі стінки порожнини [4, 8, 10].

**Інструментальний затискний патрон з  
гідропластом**

З використанням генетико-морфологічного підходу та синтезу відомих компоновок затискних

патронів [3] створений ІЗП (рис. 1) [2], в якому реалізований на хромосомному рівні силовий потік  $M_{a1} - F_{r2}$  (батьківська хромосома), де входом (джерело енергії) є сила ручного затиску  $F_p$ , яка перетворюється в момент  $M_{a1}$ , що утворює тангенціальну (крутну) силу  $F_{r0}$  і радіальну силу  $F_{r1}$  для переміщення плунжерів і створення тиску  $p_1$  рідинного (плинного) середовищ, наприклад, гідропласту, діючого на циліндричну втулку, що в кінці силового потоку створює тиск  $p_2$  на циліндричні поверхні інструменту з результируючою радіальною силою затиску  $F_{r2}$  [9].

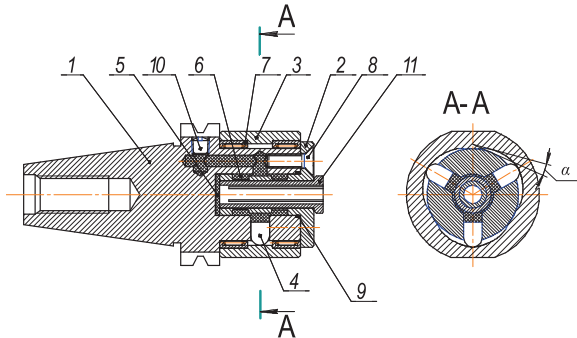


Рис. 1 – Конструктивна схема інструментального затискного патрона з гідропластом: 1 – корпус, 2 – циліндрична тонкостінна втулка, 3 – поворотна обойма, 4 – плунжер, 5 – фторопластова шайба, 6 – плинне середовище – гідропласт, 7 – голчастий підшипник, 8 – гвинт, 9 – фторонітова прокладка, 10 – пробка, 11 – цанга

### Теоретичні розрахунки внутрішніх напружень та переміщень

Для створеного ІЗП, були проведені аналітичні дослідження внутрішніх напружень та переміщень, що виникають в циліндричній тонкостінній оболонці, яка навантажена зовнішнім тиском (рис. 2).

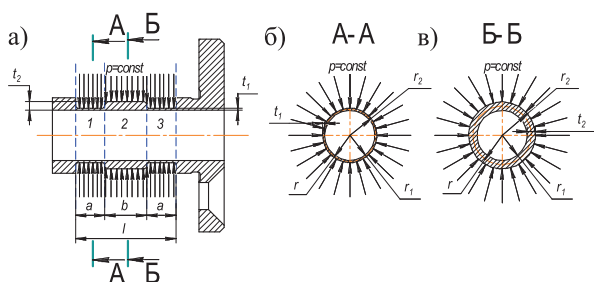


Рис. 2 – Розрахункова схема тонкостінної втулки: а – поздовжній переріз; б – поперечний при товщині  $t_1$ ; в – поперечний при товщині  $t_2$

На рис. 1. прийняті наступні позначення:  $r$  – середній радіус втулки, мм;  $r_1$  – радіус канавки, мм;  $r_2$  – радіус перемички, мм;  $a$  – ширина канавки, що стикає деталь, мм;  $b$  – ширина перемички, мм;  $l$  – ширина робочої поверхні тонкостінної втулки, мм;  $t_1$  – товщина

тонкостінної втулки, мм;  $t_2$  – товщина перемички, мм;  $p$  – тиск, МПа

Для аналітичного визначення напружень та переміщень, що виникають у тонкостінній втулці (рис. 2, а), розділимо за геометричними параметрами її робочу площину, довжиною  $l$ , на три умовні зони: 1 і 3 – робочі канавки шириною  $a$  і товщиною оболонки циліндра  $t_1$  (рис. 1, б); 2 – робоча канавка шириною  $b$  і товщиною оболонки циліндра  $t_2$  (рис. 1, в).

Спочатку розглянемо навантажений тонкостінний циліндр (рис. 3) внутрішнім та зовнішнім тиском.

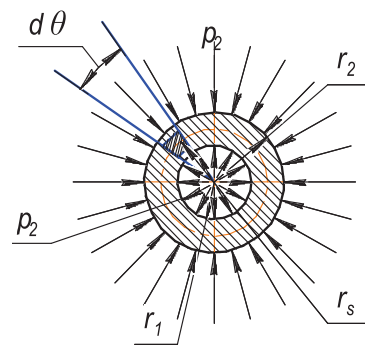


Рис.3 – Розрахункова схема тонкостінної оболонки навантаженої внутрішнім та зовнішнім тиском

Розглянемо рівновагу елементарної трапеції ABCD (рис. 4), виділеної в перерізі циліндра (рис. 3) і відповідної центральному куту  $d\theta$  [5].

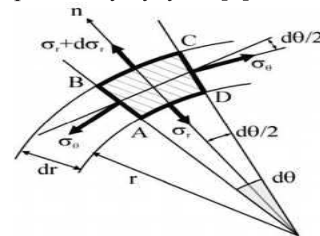


Рис. 4 – Переріз утворений двома площинами з кутом  $d\theta$

На бічних гранях трапеції (AB і CD) будуть діяти кутові напруження  $\sigma_\theta$ , на внутрішньої поверхні елемента (AD) – радіальні напруження  $\sigma_r$ , а на зовнішній (BC) - радіальні напруження  $\sigma_r + d\sigma_r$ . За причини осьової симетрії циліндра і навантажень елемент не буде перекошуватись, а це значить, що на його гранях не виникатимуть і дотичні напруження. Отже, напруження  $\sigma_\theta$  і  $\sigma_r$  – головні, причому в силу вказаної осьової симетрії перетину і навантажень величина окружних напружень  $\sigma_\theta$  не залежить від полярного кута  $\theta$ . Запишемо рівняння рівноваги для елемента ABCD, спроектувавши всі сили на нормаль до циліндричної поверхні:

$$\sum F_n = 0 \Rightarrow$$

$$-\sigma_r \cdot r \cdot d\theta + (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\theta - 2 \cdot \sigma_\theta \cdot \sin \frac{d\theta}{2} = 0$$

Враховуючи, що  $\sin \frac{d\theta}{2} = \frac{d\theta}{2}$ , і нехтуючи нескінченно малими величинами високих порядків в порівнянні з іншими, цей вислів можемо переписати таким чином:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

Задача являється один раз внутрішньо статично невизначеною.

*Геометрична сторона задачі:*

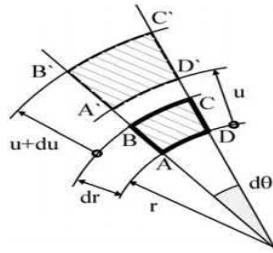


Рис. 5 – Деформація елемента ABCD

Розглянемо деформації елемента ABCD (рис. 4). Деформація елемента симетрична щодо осі і тому виникнуть лише радіальні переміщення всіх точок циліндра. При цьому точки A і D змістяться в радіальному напрямку на величину u в положення A' і D', а точки B і C – на величину u + du в положення B' і C'.

Відносна поздовжня деформація межі AB:

$$\varepsilon_r = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{B'B' - AA'}{AB} = \frac{(u + du) - u}{dr} \Rightarrow \varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (2)$$

Відносна колова деформація грані AD:

$$\varepsilon_\theta = \frac{A'D' - AD}{AD} = \frac{(r + u) - r \cdot d\theta}{r \cdot d\theta} \Rightarrow \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3)$$

*Фізична сторона задачі:*

Запишемо закон Гука для плоско-напруженого стану:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_r + \mu \cdot \varepsilon_\theta) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_\theta + \mu \cdot \varepsilon_r) \end{cases} \quad (4)$$

*Математична сторона задачі:*

Підставивши вирази (2) і (3) і формули (4), отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left( \frac{du}{dr} + \mu \cdot \frac{u}{r} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left( \frac{u}{r} + \mu \cdot \frac{du}{dr} \right) \end{cases} \quad (5)$$

Після підстановки виразів (5) в рівняння рівноваги (1), отримаємо лінійне диференційне

рівняння 2-го порядку зі змінними коефіцієнтами відносно u:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (6)$$

Записавши це рівняння у вигляді

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{d(ur)}{dr} \right] = 0$$

та інтегруючи його по r послідовно двічі, знайдемо загальний розв'язок рівняння:

$$u = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (7)$$

Підставляючи розв'язок (7) в формули (5), отримаємо вирази для знаходження напруження в точках на відстані r від осі циліндра:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[ C_1 \cdot (1+\mu) - C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[ C_1 \cdot (1+\mu) - C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r^2} \right] \end{cases} \quad (8)$$

Постійні інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  знайдемо із граничних умов, а саме – на зовнішній поверхні циліндра радіальні напруження рівні зовнішньому тиску, а на внутрішній – внутрішньому:

$$r = r_2; \sigma_r = -p_2 \Rightarrow \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[ C_1 \cdot (1+\mu) - C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r_2^2} \right] = -p_2$$

$$r = r_1; \sigma_r = -p_1 \Rightarrow \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[ C_1 \cdot (1+\mu) - C_2 \cdot \frac{1-\mu}{r_1^2} \right] = -p_1$$

Розв'язуючи ці рівняння відносно  $C_1$  і  $C_2$ , знайдемо:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2}; \\ C_2 &= \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2}. \end{aligned}$$

Підставляючи значення сталих u вирази (7) і (8), отримаємо формули для визначення радіального переміщення і та напружень (формули Ламе):

$$\begin{cases} u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r} \\ \sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot (p_1 - p_2)}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r^2} \end{cases} \quad (9)$$

Припустимо, що  $t_1 = t_2$ , тоді

**Аналітичні розрахунки внутрішніх напружень та переміщень**

Отримавши формули для визначення напружень і переміщень (9), що виникають у тонкостінній оболонці під дією рівномірно розподіленого зовнішнього і внутрішнього тиску (рис. 6) по всій довжині кола можна розрахувати напруження і переміщення для тонкостінної циліндричної втулки ІЗП (рис. 1). Для цього припустимо, що  $r_1=r_2=6,52$  мм,  $r=6,26$  мм.

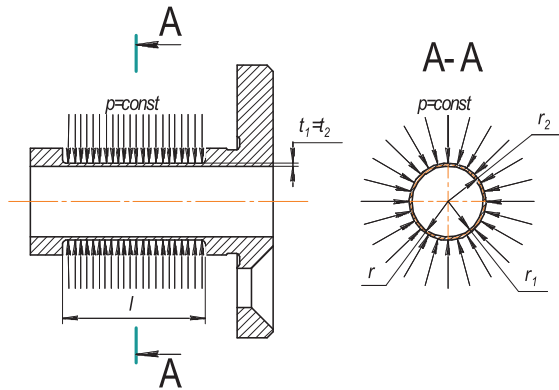


Рис. 6 – Тонкостінна втулка під дією зовнішнього тиску

В даному випадку формули (9) набувають наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{aligned} u &= \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot r - \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{1}{r_s} \\ \sigma_r &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_s^2}\right) \cdot p \\ \sigma_\theta &= -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r_s^2}\right) \cdot p \end{aligned} \right.$$

де  $r_s = r$  – радіус середньої лінії тонкостінної оболонки.

Підставивши вхідні дані, отримаємо:

Таблиця 1 – Напруження і переміщення у тонкостінній втулці

| t <sub>1</sub> , мм   | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0,52                  | 1                    | 2,5                  | 5,0                  | 7,5                  | 10                   | 12,5                 |
| $\sigma_r$ , МПа      | 0,53                 | 1,33                 | 2,66                 | 3,98                 | 5,31                 | 6,64                 |
| $\sigma_\theta$ , МПа | 13,0                 | 32,6                 | 65,2                 | 97,9                 | 130                  | 163                  |
| u, мм                 | 1,2×10 <sup>-5</sup> | 2,3×10 <sup>-4</sup> | 6,1×10 <sup>-4</sup> | 9,9×10 <sup>-4</sup> | 1,3×10 <sup>-3</sup> | 1,7×10 <sup>-3</sup> |

Обидва напруження ( $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$ ) стискальні, причому за абсолютним значенням  $\sigma_\theta > \sigma_r$ , а радіальне

переміщення напрямлене до осі втулки (радіуси зменшуються).

Біля внутрішньої поверхні ( $r=r_1$ ):

$$\left\{ \begin{aligned} u &= -\frac{r_1}{E} \cdot \frac{2}{1-k^2} \cdot p \\ (\sigma_r)_{r=r_1} &= 0 \\ (\sigma_\theta)_{r=r_1} &= -\frac{2}{1-k^2} \cdot p \end{aligned} \right. \quad (10)$$

де  $k=r_1/r_2$ .

Підставивши вхідні дані із табл. 1 у рівняння (10), отримаємо:

Таблиця 2 – Напруження і переміщення у тонкостінній втулці біля внутрішньої поверхні

| t <sub>1</sub> , мм   | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               | p, МПа               |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0,52                  | 1                    | 2,5                  | 5,0                  | 7,5                  | 10,0                 | 12,5                 |
| $\sigma_r$ , МПа      | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |
| $\sigma_\theta$ , МПа | 13,0                 | 32,6                 | 65,2                 | 97,9                 | 130,5                | 163,2                |
| u, мм                 | 3,9×10 <sup>-4</sup> | 9,7×10 <sup>-4</sup> | 1,9×10 <sup>-3</sup> | 2,9×10 <sup>-3</sup> | 3,9×10 <sup>-3</sup> | 4,8×10 <sup>-3</sup> |

Біля зовнішньої поверхні ( $r=r_2$ ):

$$\left\{ \begin{aligned} u &= -\frac{r_2}{E} \cdot \left(\frac{1+k^2}{1-k^2} - \mu\right) \cdot p \\ (\sigma_r)_{r=r_2} &= -p \\ (\sigma_\theta)_{r=r_2} &= -\frac{1+k^2}{1-k^2} \cdot p \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Підставивши вхідні дані із табл. 1 у рівняння (11), отримаємо:

Таблиця 3 – Напруження і переміщення у тонкостінній втулці біля зовнішньої поверхні

| t <sub>1</sub> , мм   | p, МПа                | p, МПа                | p, МПа                | p, МПа                | p, МПа                | p, МПа                |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,52                  | 1                     | 2,5                   | 5,0                   | 7,5                   | 10,0                  | 12,5                  |
| $\sigma_r$ , МПа      | -1                    | -2,5                  | -5,0                  | -7,5                  | -10,0                 | -12,5                 |
| $\sigma_\theta$ , МПа | -12,05                | -30,15                | -60,29                | -90,44                | -120,59               | -150,74               |
| u, мм                 | -3,8×10 <sup>-4</sup> | -9,6×10 <sup>-4</sup> | -1,9×10 <sup>-3</sup> | -2,9×10 <sup>-3</sup> | -3,9×10 <sup>-3</sup> | -4,8×10 <sup>-3</sup> |

На основі отриманих значень  $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$  та u із табл. 2 і 3 будуюмо епюри напружень рис. 7.

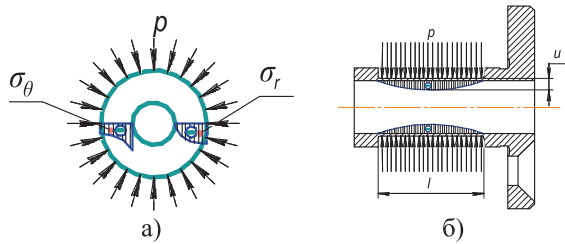


Рис. 7 – Епюри: а – напружень; б – переміщення.

**Висновки**

- 1) напруження у всіх точках тонкостінної втулки (рис. 7, а) від’ємні, що відповідає стисканню;
- 2) аналіз формул Ламе (9) показує, що збільшення товщини  $t$  не може у всіх випадках забезпечити необхідну міцність тонкостінної оболонки. Тому прийнята товщина тонкостінної циліндричної втулки залишається не змінною,  $t_1=0,52$  мм [7];
- 3) для роботи під великим тиском необхідно шукати інші конструктивні рішення. Одним з таких рішень є використання більш міцніших матеріалів (збільшення  $[\sigma]$ ). В даному випадку буде використано матеріал для виготовлення Сталь 40Х ГОСТ 8731-87 з термічною обробкою: закалювання та нагрів СВЧ  $h$  1,8...2,2; відпуск – HRC 35...40.

**Список літератури**

1. Дума, Р. К. Зажимные приспособления с использованием гидропластмассы. – М., Mashgiz. – 1951.
2. Кузнецов, Ю. Н. Инструментальные зажимные патроны / Ю. Н. Кузнецов, В. Н. Волошин, В. Б. Фиранский, О. А. Гуменюк // К.: ООО "ГНОЗИС". – 2012. – 286 с.
3. Кузнецов, Ю. Н. Генетико-морфологический подход к созданию и прогнозированию развития зажимных механизмов для вращающихся деталей / Ю. Н. Кузнецов, А. Г. Хамуйела Жоаким, Ангел Попаров // *Journal of the Technical University – Sofia. – Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications"*. – Bulgaria. – 2013. – vol. 19, Book 2. – С. 117-13.
4. Кузнецов, Ю. М. Експериментальні дослідження високшвидкісного інструментального затискного патрону з пружним елементом затиску / Ю. М. Кузнецов, В. Б. Фіранський, О. В. Грисюк, В. Н. Волошин // *Вісник ХНТУСГ*. – 2008. – № 45. – С. 294-299.
5. Кузнецов Ю. Н. Расчет и экспериментальные исследования силовых характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона / Ю. Н. Кузнецов, В. А. Недобой, Герра Ж. А. Хамуйела // *International Scientific Conference «UNITECH '13»*. – Gabrovo, UNITECH-2013. – 2013.
6. Писаренко, Г. С. Сопrotivление материалов / Г. С. Писаренко, В. А. Агаев, А. Л. Квитка, В. Г. Попков, Э. С. Уманский // Под ред. акад. АН УССР Писаренко Г. С., Киев, Вища школа. – 1986.
7. Недобой, В. А. Експериментальні дослідження впливу конструкції хвостовика інструмента на характеристики затискного патрона / В. А. Недобой, Ю. М. Кузнецов, Жоаким Аугушто Хамуйела Гера // *Журнал інженерних наук*. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. А8-А12.

8. Свириденко, С. Х. Элементы автоматизации металлорежущих станков / С. Х. Свириденко, Л. С. Ахметет, А. А. Волков и др. – «Машиностроение», Москва. – 1964. – 183 с.
9. Цвид, Т. А. Пружно-напружений стан інструментального затискного патрона з рідинно-плинним середовищем / Т. А. Цвид, Ю. М. Кузнецов // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу»*. – 2016.
10. Эль-Дахаби, Ф. В. Принципы проектирования высокоскоростных зажимных патронов / Ф. В. Эль-Дахаби, Ю. Н. Кузнецов, М. Т. Хазим // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія машинобудування. – 2014. – №3 (72). – С. 175 -180.
11. Фіранський, В. Б. Пружно-напружений стан інструментальнозатискних патронів нової конструкції / В. Б. Фіранський // *Збірник наукових праць «Вісник Націо-нального технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія Машинобудування. – 2010. – Вип.59. – С. 19-23.
12. Hasan Al Dabbas A Study of Efficiency Eccentric Drilling-Milling Chuck / Hasan Al Dabbas // *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. –Vol. 3. Is. 1. – P. 5-8. – doi:10.7763/IJMMM.2015.V3.155.
13. Alquraan, T. High-speed Clamping Mechanism of the CNC Lathe with Compensation of Centrifugal Forces / T. Alquraan, Yu. Kuznetsov, T. Tsvyd // *Journey Procedia Engineering. Publisher*. – 2016. – № 150. – P. 689-695. – doi:10.1016/j.proeng.2016.07.081.
14. Затискний патрон / Ю. М. Кузнецов, Т. А. Цвид // МПК В23Q 1/00, В23В 31/02, В23В 31/30. Патент № 104300 від 25.01.2016

**Bibliography (transliterated)**

1. Duma, R. K. Zazhimnye prispособlenija s ispol'zovaniem gidroplastmassy. Moscow, Mashgiz, 1951.
2. Kuznecov, Ju. N., Voloshin, V. N., Firanskij, V. B., Gumenjuk, O. A. *Instrumental'nye zazhimnye patrony*. – Kyiv: ООО "GNOZIS", 2012, 286 p.
3. Kuznecov, Ju. N., Hamujela Zhoakim, A. G., Angel Poparov Genetiko-morfologicheskij podhod k sozdaniju i prognozirovaniju razvitija zazhimnyh mehanizmov dlja vrashhajushhihsja detalej // *Journal of the Technical University – Sofia. – Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications"*. – Bulgaria, 2013, 19(2), 117-13.
4. Kuznecov, Ju. M., Firans'kij, V. B., Grisjuk, O. V., Voloshin, V. N. Eksperimental'ni doslidzhennja visokshvidkисного instrumental'nogo zatiskного patronu z pruzhnim elementom zatiskу. *Vіsник HNTUSG*, 2008, 45, 294-299.
5. Kuznecov, Ju. N., Nedoboj, V. A., Gerra Zh. A. Hamujela Raschet i jeksperimental'nye issledovanija silovyh harateristik vysokoskorostного instrumental'nogo zazhimного patrona. *International Scientific Conference «UNITECH '13»*, Gabrovo, UNITECH-2013, 2013.
6. Pisarenko, G. S. Agaev, V. A, Kvitka, A. L., Popkov V. G., Umanskij, Je. S. Sopotivlenie materialov. Pod red. akad. AN USSR Pisarenko G.S., Kiev, Vishha shkola, 1986.
7. Nedoboj, V. A. Kuznecov, Ju. M., Zhoakim Augushto, Hamujela Gera Eksperimental'ni doslidzhennja vplivu konstrukції hvostovika instrumenta na harakteristiki zatiskного patrona. *Zhurnal inzhenernih nauk*, 2014, 1(2), A8-A12.



8. **Sviridenko, S. H., Ahmechet, L. S., Volkov, A. A.** i dr. Jelementy avtomatizacii metallovezhushnih stankov. Mashinostroenie, Moskva, 1964, 183 p.
9. **Tsvyd, T. A., Kuznetsov, Ju. M.** Pruzhno-napruzhenij stan instrumental'nogo zatisknogo patrona z ridinno-plinnim seredovishhem. *Materiali mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencii «Suchasni tehnologii promislavogo kompleksu»*, 2016.
10. **Jel'-Dahabi, F. V., Kuznetsov, Ju. N., Hazim, M. T.** Principy proektirovanija vysokoskorostnyh zazhimnyh patronov. *Visnik NTUU «KPI». Serija Mashinobuduvannja*. 2014, 3(72), 175-180.
11. **Firans'kij, V. B.** Pruzhno-napruzhenij stan instrumental'nozatsisknih patroniv novoï konstrukcii. *Zbirnik naukovih prac' «Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu Ukraïni «Kiïvs'kij politehnicnij institut». Serija Mashinobuduvannja*. 2010, 59, 19-23.
12. **Hasan Al Dabbas** A Study of Efficiency Eccentric Drilling-Milling Chuck. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. 3(1), 5-8, doi:10.7763/IJMMM.2015.V3.155.
13. **Alquraan, T., Kuznetsov, Yu., Tsvyd, T.** High-speed Clamping Mechanism of the CNC Lathe with Compensation of Centrifugal Forces. *Journey Procedia Engineering. Publisher*. 2016, 150, 689-695, doi:10.1016/j.proeng.2016.07.081.
14. **Kuznetsov, Ju. M., Tsvyd, T. A.** Zatsisknij patron. MPK B23Q 1/00, B23B 31/02, B23B 31/30. Patent № 104300 vid 25.01.2016

#### Відомості про авторів (About authors)

**Цвид Тарас Антонович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», аспірант кафедри конструювання верстатів та машин, м. Київ, Україна, e-mail: tsvyd1003@gmail.com

**Taras Tsvyd** – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" graduate student of design tools and machines, Kyiv, Ukraine, e-mail: tsvyd1003@gmail.com

**Кузнецов Юрій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри конструювання верстатів та машин, м. Київ, Україна, e-mail: zmok@mail.ru

**Yuriy Kuznetsov** – Doctor of Engineering, professor National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", professor of design tools and machines, Kyiv, Ukraine, e-mail: zmok@mail.ru

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Цвид, Т. А.** Аналітичне визначення внутрішніх напружень та переміщень тонкостінної втулки інструментального затискного патрона / **Т. А. Цвид, Ю. М. Кузнецов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 132-137. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.20.

*Please cite this article as:*

**Taras Tsvyd, Yuriy Kuznetsov** Analytical determination of internal stress and displaced Thin-walled plug. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 25 (1197), 132-137, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.20.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Цвид, Т. А.** Аналитическое определение внутренних напряжений и перемещений тонкостенной втулки инструментального зажимного патрона / **Т. А. Цвид, Ю. Н. Кузнецов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 132-137. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.20.

**АННОТАЦИЯ.** Отмечено, что зажимные патроны выполняют одну из важных функций - обеспечение необходимой силы зажима детали или инструмента в процессе высокоскоростной обработки на станках с ЧПУ. Описанный принцип работы инструментального зажимного патрона (ИЗП) с гидропластом, созданного с использованием генетико-морфологического подхода и выполнен теоретический анализ внутренних напряжений и перемещений основного зажимного элемента - цилиндрической тонкостенной втулки. Предложены и теоретически обоснованы рекомендации по выбору конструктивных параметров цилиндрической тонкостенной втулки.

**Ключевые слова:** инструментальный патрон с гидропластом, цилиндрическая тонкостенная втулка, генетико-морфологический подход, внутренние напряжения, упругие перемещения

Надійшла (received) 09.06.2016

УДК 551.

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.21

**ТЕОРЕТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІЧ ТА НВЧ РАДІОМЕТРІЇ НА ПРИКЛАДІ СУПУТНИКОВОГО ПРОЕКТУ NASA – JAXA****В. І. МИХАЙЛОВ, Н. В. КУЧЕРЕНКО\*, О. Г. БАРГАН**

Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, УКРАЇНА

\*e-mail: tsb1@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Розглядається проблема відповідності даних про температуру води в рідкому стані, отриману дистанційними методами за рахунок випромінювання, та температуру, яку отримують контактним, тобто, термодинамічну температуру.

**Ключові слова:** skin – шар води, радіояскравісна температура, термодинамічна температура, супутникові методи, інфрачервоне випромінювання.

**THEORETICAL PROBLEMS OF APPLICATION OF INFRARED AND MICROWAVE RADIOMETRY ON THE EXAMPLE OF NASA– JAXA SATELLITE PROJECT****V. MIKHAILOV, N. KUCHERENKO\*, O. BARGAN**

Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium ", c. Odessa, Ukraine

\*e-mail: tsb1@ukr.net

**ABSTRACT** The problem of matching the data on the temperature of water in the liquid state, which is obtained by remote sensing, as a result of the radiation, and the water temperature measured by the conventional contact methods (thermodynamic temperature). Physical causes the formation of radiating skin-layer hydrosphere discussed in detail. It is proved that the cause of the formation of cold skin-layer is radiation, not evaporation, as previously thought. It was shown that skin - layer is continuously existing natural formation on the surface of the hydrosphere because it has a lower density (relatively low salinity, low temperature, especially frontier structure, high gas saturation through which water becomes more structurally ordered (quasi-crystalline) and lighter). It serves as the self-energy and mass exchange between the ocean and atmosphere interactions downward, that leads contact layer system ocean - atmosphere to condition the lowest possible entropy in the circumstances. The temperature of the ocean surface in the infrared and microwave bands, obtained by remote methods - is the temperature, which characterizes the ocean as a result of its interaction with the atmosphere at some point. Therefore, the exact function of the transition from brightness water temperature (energy characteristics of a thin surface layer) to bulk thermodynamic temperature, in the light of the research and theory can not exist.

**Keywords:** skin - layer of water, brightness temperature, thermodynamic temperature, satellite techniques, infrared radiation.

**Вступ**

Розглядається проблема відповідності отриманих дистанційно даних температури поверхні океану (ТПО, skin – шар, ПМШ - поверхневий мікросар) та температури атмосферних опадів нашим уявленням про температуру води, яку отримували контактним та використовували для дослідження процесів, що відбуваються безпосередньо в океані, в межах взаємодії океану та атмосфери, моделювання цих процесів. Температура є фізичним параметром, який впливає практично на всі головні характеристики води. Наприклад, густину морської води, яка входить до всіх загальновідомих формул динаміки, швидкість звуку у воді; формул обміну теплом та масою між океаном та атмосферою та ін.

**Постановка та актуальність проблеми**

Скануючі багатоканальні ІЧ-радіометри, встановлені на метеорологічних супутниках, є нині основним засобом отримання інформації про температуру гідросфери в районах, вільних від

хмарності, туману і аерозольних викидів. НВЧ методи досліджень здатні отримувати інформацію про температуру в будь-який час доби і при будь-якій погоді [1]. Однак, ця енергетична інформація характеризує не тільки температуру досліджуваної поверхні, але й інші фізичні фактори стану водної поверхні.

Супутникові спостереження дуже ефективні та економічні. Використання для досліджень гідросфери Землі контактних методів вимірювання температури, що мають обмежені можливості за просторовим дозволом і не дають змоги з достатньою точністю оцінювати температуру самої поверхні води, можна вважати архаїчними. Дистанційні неконтактні методи вимірювання температури океану мають ряд переваг в порівнянні з традиційними контактними методами, головні з яких очевидні – це, по-перше, можливість оперативного збору інформації з великої території за невеликий проміжок часу; по-друге, - відсутність безпосереднього контакту датчика з об'єктом, температура якого вимірюється, тобто датчик не впливає на теплове поле об'єкта; по-третє, висока чутливість та невелика інерційність приймачів

© В. І. МИХАЙЛОВ, Н. В. КУЧЕРЕНКО, О. Г. БАРГАН, 2016

випромінювання, які використовуються [3]. Якість та достовірність супутникових досліджень безпосередньо залежить від рівня їх метрологічного забезпечення та точності радіометричного калібрування зондуючої апаратури, від точності, з якою відомі випромінювальні характеристики водної поверхні, а також від впливу проміжного шару атмосфери. При цьому виникає завдання оцінки та підвищення точності даних дистанційного зондування температури морської поверхні. Рішенням цього вважається зіставлення (калібровка) супутникових даних з даними контактних вимірювань, що проводяться безпосередньо в морі, і які беруться за еталонні. Але при зіставленні даних дистанційного моніторингу температури поверхні гідросфери і контактних вимірювань виникає ряд теоретичних проблем, які ми розглянемо в даному дослідженні.

Супутникове обладнання та ефективне програмне забезпечення дають можливість отримувати, обробляти та аналізувати отриману інформацію з метою діагнозу та прогнозу процесів в океані та атмосфері. Для створення ефективного обладнання з отримання супутникової інформації в багатоспектральному діапазоні, необхідно оперувати коректними моделями фізичних процесів, які враховуються при створенні алгоритму розрахунку. Так, наприклад, у найсучаснішому проекті NASA – JAXA, в якому здійснюється моніторинг атмосферних опадів з використанням радіолокації, інфрачервоної та надвисокочастотної радіометрії вважається, що ефективність випромінювання морської поверхні в інфрачервоному діапазоні відрізняється від випромінювання водяних крапель [4]. При обробці даних використовуються різні алгоритми обробки ІЧ вимірювань температури водяних крапель та морської поверхні. Це методичне рішення нам здається помилковим і потребує уточнення, в першу чергу на теоретичному рівні. Це стосується, в основному, абсолютно аномальних властивостей води, які обумовлені особливостями її структури, яка в свою чергу формується особливостями динаміки міжмолекулярних зв'язків, які є результатом того, що молекула води є диполь, тобто має два різнойменно заряджені полюси. Завдяки цьому (водневому зв'язку), молекули води створюють різнонасичені асоціації молекул, які реагують на зовнішній вплив як одне ціле. Звідси, відповідно до другого закону Ньютона, і реакції (у фізичному сенсі) різних конструкцій асоціацій будуть різними, що і обумовлює непередбачуваність фізичних властивостей води (відносно аналогів води, тобто з'єднань водню з елементами VI підгрупи таблиці хімічних елементів Д.І.Менделєєва). Тобто, вода ніби має різну молекулярну вагу в різних умовах. Більш того, на межах фаз (рідина – газ, рідина - тверде тіло) вода, навіть при позитивних температурах, має льодоподібну квазікристалічну структуру з усіма властивостями, які відповідають властивостям льоду. Поверхня океану, так само, як і поверхня крапель

води, завжди знаходиться на межі фаз вода – повітря, тобто має квазікристалічну структуру, яка радикально відрізняється від структури води в об'ємі і яка, безумовно, буде впливати на випромінювальну здатність води, тобто на інтенсивність та якісний склад випромінювання на різних довжинах хвиль [5, 6, 11, 13].

На нашу думку у проекті NASA – JAXA також не приділяється необхідної уваги різниці між термодинамічною та радіояскравісною температурами, існуванню фундаментальних відмінностей передачі енергії електромагнітними хвилями та контактним теплообміном, які потребують досліджень. Тобто, неузгодженість супутникових і контактних даних температури води виникає також і через відмінності фізичних принципів вимірювань. Крім того, на сучасному етапі, отриману ТПО за радіояскравісною температурою порівнюють з термодинамічною температурою, вимірюваною не в поверхневому мікрошарі гідросфери (skin – шарі) а в об'ємі води.

#### Стан вивченості проблеми (температурний skin-шар океану)

Відомо, що температура не може бути виміряна безпосередньо. Про зміну термодинамічної температури судять за зміною фізичних властивостей тіл: об'єму, тиску, електричного опору, ЕРС, та ін. (так званих термометричних властивостей). У термодинаміці приймається положення про те, що термодинамічна температура є величина, для всіх систем обмежена з одного боку, причому температура, відповідна цій межі, однакова для всіх термодинамічних систем. Кількісно ж температура визначається за значенням способу її вимірювання. Таке визначення ще не фіксує ні початок відліку, ні одиницю виміру температури, тому будь-який метод вимірювання температури пов'язаний з вибором температурної шкали. З нашої точки зору найменш коректною є температурна шкала Цельсія, в основу якої покладені дві реперні точки абсолютно аномальної речовини – води. Розподіл відстані між температурою замерзання та температурою кипіння води на 100 однакових частин (ціна ділення, градус Цельсія) не є правильним, адже для того, щоб нагріти воду на 1°C від 2 до 3 градусів, необхідно затратити певну кількість тепла, яка відрізняється від кількості тепла, що надається воді при нагріванні на той самий один градус від 90 до 91 чи від 35 до 36 градусів. Це пов'язано з тим, що теплоємність води змінюється при зміні температури. Більш того, вона змінюється за нелінійною залежністю (див. рис.1). Температурна шкала повинна бути розділена на неоднакові проміжки, які б відповідали (були пропорційні) кількості витраченого тепла на різних проміжках нагрівання. Особливо це стосується вимірювання температури в системах, в яких вода є невід'ємною часткою, тобто, практично усіх природних системах

Землі, які вивчаються: атмосфері, гідросфері, твердій поверхні, тваринному та рослинному світі.

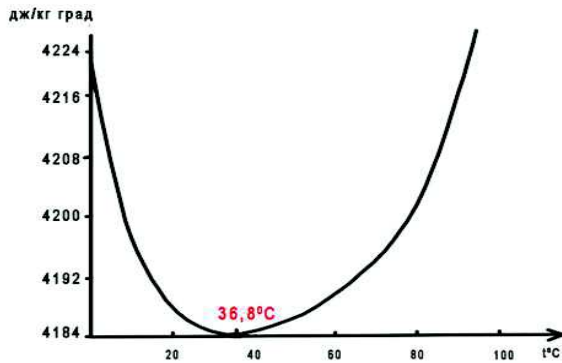


Рис. 1 – Залежність теплоємності води від температури [4].

Радіояскравісна температура не є температурою у термодинамічному розумінні. Вона характеризує випромінювання, і в залежності від механізму випромінювання може значно відрізнятися від фізичної температури випромінюючого тіла. Невизначеність радіояскравісної температури привела до необхідності забезпечення єдності вимірювань та створення державного первинного еталона одиниць радіояскравісної температури і спектральної щільності енергетичної яскравості в мікрохвильовій області спектра [8]. На сучасному рівні розвитку супутникових технологій, при вимірюванні температури води (температури поверхні океану та температури атмосферних опадів у рідкому стані) точна функція переходу від радіояскравісної температури (плівкова температура) до термодинамічної температури (об'ємна температура) теоретично не може існувати. Це пов'язано з існуванням на поверхні води поверхневого шару (skin-шару) з аномальними температурними характеристиками: температура води в ньому практично завжди нижча від температури об'ємної води. Хоча структура води в ньому теж відрізняється від об'ємної, особливий акцент завжди робився саме на експериментально встановлену занижену температуру цього шару [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 16]. Виходячи з того, що теплове випромінювання водної поверхні в тепловому діапазоні хвиль формується в поверхневому шарі води товщиною до 1-3 мм, констатується факт відповідної похибки вимірювання температури океану інфрачервоними сканерами. [17]. При спокійних гідрометеорологічних умовах відхилення радіояскравісної температури води від її термодинамічної температури складають в середньому 0,4 - 2°C [18], максимальні відхилення можуть досягати 5-7°C і більше [19]. За наявності

таких відхилень виникла необхідність проведення наукових досліджень поверхневого мікросшару, лабораторних та підсупутникових експериментів. Стало очевидним, що skin-шар – це специфічне фізичне явище, яке виконує саморегулюючі функції в процесах теплової взаємодії океану та атмосфери за приблизно такою схемою [20]. Відповідно до закону Стефана – Больцмана, енергія, випромінена тілом, пропорційна четвертому ступеню його абсолютної температури:

$$E = \sigma \varepsilon T^4, \quad (1)$$

де  $T$  – абсолютна температура тіла, що випромінює;  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$  [6];  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність об'єкта.

Чим більша температура, тим більше випромінюється енергії, яка губиться гідросферою, і тим нижча температура її skin-шару. А чим нижча температура skin-шару – тим менше енергії випромінюється. Причому, враховуючи подвійну квадратичну залежність енергії від температури, невеликі зміни температури – різко змінюють кількість загубленої енергії. При зниженні температури skin - шару та різкому зменшенні випромінювання, його температура підвищується також і за рахунок підведення тепла знизу. А при зростанні температури – збільшується випромінювання тепла skin - шаром з відповідним зниженням його температури з наступним етапом відповідного зменшення випромінювання. І так повторюється безкінечно; тобто система автоматичного саморегулювання працює (за типом від'ємного зворотного зв'язку) на формування оптимальної енергетичної взаємодії, однак, яка завжди направлена на збереження індивідуальності взаємодіючих частин. Ця система дуже динамічна і ефективна завдяки особливій структурі та невеликим розмірам взаємодіючих шарів як в океані, так і в атмосфері.

Більшість авторів, опираючись на встановлений факт від'ємної аномалії температури skin – шару вважали, що причиною її формування є процес випаровування. Саме тому вважалося і вважається, що солоність поверхневого мікросшару більша від солоності підстильної води; а за умов позитивної аномалії солоності та від'ємної аномалії температури, густина цього шару має характеризуватися позитивною аномалією. Однак, експериментальні дані не завжди це підтверджували [18, 22]. Слід зазначити також, що результати виконаних досліджень не давали значного збагачення солями при допущенні про нестійку стратифікацію поверхневого мікросшару [23, 24]. Незважаючи на це, в лабораторіях штучно створювались умови густинної нестійкості skin - шару з наступними дослідженнями мікроконвекції з його участю [25, 26, 27, 28]. В результаті були створені помилкові класифікації

вертикальних рухів в поверхневому мікрошарі води за видами.

У зв'язку з цим почали розвиватись теоретичні (фізико-математичні) моделі поверхневого мікрошару (Лью та Бусінгера, Ховарда, Фостера, Нікіфоровича Є.І.). Теоретичні моделі звичайно базувалися на «очевидному» допущенні про нестійку стратифікацію поверхневого мікрошару як результату низької температури та високої солоності (за рахунок випаровування). Тому отримані результати моделювання мікроконвекції у цьому шарі (періодичної, стаціонарної, вільної, вимушеної) є результатом початкових умов нестійкості в моделях skin - шару. Якщо в основу моделі покласти умову стійкості поверхневого шару [29, 30], то і результати будуть іншими. Але для цього необхідне фізично та експериментально обгрунтоване спростування допущення про нестійку густинну стратифікацію в поверхневому мікрошарі морської води.

#### Стан вивченості проблеми (солоність та причини виникнення skin-шару)

Було дуже мало спроб визначити експериментально солоність skin - шару [23] в основному тому, що не існувало і не існує можливості точного інструментального визначення профілю солоності в тонких міліметрових шарах, тим більше, що здавалось очевидним його збагачення солями за рахунок випаровування, як основної причини втрат тепла, для формування холодного мікрошару. Натурні експерименти з визначення інтегральної солоності давали різні результати, а методика відбирання проб з тонкого поверхневого шару страждала від похибок, пов'язаних, в основному, з активним штучним випаровуванням з поверхні сіткового пробовідбірника під час відбирання проби.

Нами був зроблений детальний додатковий аналіз інших можливих похибок визначення солоності ПМШ, які штучно завищують солоність в ньому (за рахунок підвищеного накопичення мікроелементів та їх неадекватного впливу на електропровідність, зменшення об'єму відібраної рідини при зберіганні кількості солі). Крім цього, відповідно до досліджень видатного гідрохіміка Р.Хорна та ін. [31, 32] вода, як розчин, є поверхнево активним компонентом, що адсорбується в поверхневому шарі. Тобто, поверхня морської води повинна бути покрита шаром прісної води, товщина якого, однак, невідома.

Ретельно відібрані нами проби при різних фіксованих температурах води та повітря на узбережжі Чорного моря (Одеса, Геофізична обсерваторія ОГМІ) продемонстрували, що чим нижча температура води, тим товстіший поверхневий мікрошар і тим більше шансів зафіксувати, навіть недосконалими стандартними методами, його знижену, відносно підстильної води, солоність (див. табл.1). Таким чином, очікуваного збагачення верхнього шару морської води солями за рахунок

випаровування не спостерігається і причина утворення холодного мікрошару може бути інша.

Таблиця 1 – Залежність різниці солоності між skin-шаром та підстильною водою (на глибині 5 см)

| № проби | $\Delta S\%$ | $T_w$ , °C |
|---------|--------------|------------|
| 1       | -0,100       | 17,6       |
| 2       | -0,114       | 17,8       |
| 3       | 0,218        | 18,4       |
| 4       | 0,264        | 19,9       |
| 5       | 1,073        | 20,3       |
| 6       | 0,185        | 18,4       |

В багатьох класичних [33] та сучасних роботах [34] наводяться оцінки теплового балансу поверхні океану. Типово вважається що не менше 51% потоку енергії губиться океаном на процес випаровування; до 42% витрат займає довгохвильове теплове випромінювання води; 7% потоку припадає на контактний теплообмін, в який теж задіяна тільки поверхня. Хоча в інших поважних джерелах [35, 36, 37] випаровуванню надається від 70 до 90% витрат енергії океаном. Однак відомо, що в результаті інсоляції верхній сантиметр води поглинає всього біля 20% сонячної радіації а та, що залишилась, проникає в більш глибокі шари морської води і вже там поглинається, тобто трансформується в тепло. Таким чином, у верхньому сантиметровому шарі води радіаційна витрата тепла перевищує прихід не менше, ніж на 80%. Це загальновідомі факти, на які мало звертається увага. Можна також навести приклади деяких експериментальних досліджень, які не мали ціллю спростувати вплив випаровування на формування холодного поверхневого мікрошару. Наприклад, в результаті вимірювань вертикального розподілу температури НВЧ радіометром в поверхневому шарі прісної води, покритому нафтовою плівкою [38], що зменшувала випаровування на 50-87%, отримані профілі температури води в ПМШ не відрізнялися від профілів температури води з чистою поверхнею. Аналізуючи отримані дані [38, 39], можна зробити висновок, що вплив випаровування на формування холодного поверхневого мікрошару незначний. Таким чином, виникає необхідність більш детально розглянути процес випаровування з поверхні морської води.

Дотепер навіть поняття фізичної суті процесу випаровування є дискусійним. Наприклад, випаровування, як дифузія в атмосферу молекул, що володіють аномальною кінетичною енергією, не узгоджується з уявленнями про структурованість води, мова про яку була вище. Прийнято вважати, що не скомпенсовані міжмолекулярні сили зовнішнього (поверхневого) шару води, викликані квантово-механічними причинами, створюють зовнішню пружну плівку. Серед існуючих в природі рідин поверхневий натяг води поступається тільки ртуті.

Тому теплота випаровування води більша теплоти випаровування будь-яких інших рідин. І саме тому випаровування з поверхні води повинно було б бути унікальним, а не типовим явищем. Тому нами ставиться під сумнів, що витрати тепла морською поверхнею за рахунок випаровування оцінені як 51 і більше відсотків.

Для цього наведемо кілька прикладів науково обгрунтованих розрахунків випаровування води.

В теоретичній роботі [40] для розрахунків було використано головне динамічне рівняння адсорбції:

$$\gamma = n\tau, \tag{2}$$

де  $\gamma$  - кількість адсорбованої речовини (молекул/м<sup>2</sup>);  $n$  - кількість молекул, що стукаються об одиничну поверхню в одиницю часу (молекул/м<sup>2</sup> с);  $\tau$  - час адсорбції, тобто затримки на поверхні (с).

Число  $n$  визначалось через рівняння, що базується на кінетичній теорії газів:

$$n = Np / \sqrt{2\pi MRT}, \tag{3}$$

де  $N$  – число Авогадро;  $M$  – молекулярна вага газу.

Використовуючи загальноприйняте у фізиці поняття динамічної рівноваги між паром та поверхневим шаром рідини, число молекул, що торкаються води ( $n$ ) і певний час залишаються на ній (адсорбованих), повинно дорівнювати числу молекул, що відриваються від поверхні (десорбованих) та вилітають в повітря ( $n_v$ ). Ці дві величини повинні бути рівними, не дивлячись на різну природу процесів, що відбуваються: перша визначається тільки властивостями пари, а друга – адсорбційними властивостями поверхні. Тобто, у стані рівноваги ці величини рівні і процеси ідуть з дуже великою швидкістю, оскільки  $n$  дуже велике. За даними [40] число адсорбованих (десорбованих) молекул води практично миттєво (10<sup>-6</sup> с) може утворити моношар з  $n = 10^{15}$ . Розрахунок швидкості випаровування води з водної поверхні за рівнянням (3) з врахуванням умови динамічної рівноваги, дає величину, що як мінімум, на 5 порядків перевищує середню реальну (0,0625 відносно 9 000 кг/годину · м<sup>2</sup> відповідно).

Існують й інші формули розрахунку інтенсивності випаровування певного стандарту, наприклад, VDI 2086 [41]:

$$W = s A (P_s - P_d) \text{ [г/годину]}, \tag{4}$$

де  $A$  – площа поверхні води, м<sup>2</sup>;  $P_s$  – парціальний тиск пари при параметрах повітря, мбар;  $P_d$  – тиск насиченої пари при температурі поверхні води, мбар;  $s$  – коефіцієнт випаровування, г/ годину · м<sup>2</sup>.

Вони дають зовсім інші результати. При фіксованому дефіциті водяних парів над водною поверхнею, випаровування в умовах хвилювання у 7

разів ефективніше ( $s = 5$  – штиль, та  $s = 35$  відповідно). А при порівнянні з умовами «накритої чаші» (насиченого стану атмосфери) кількість випаруваної води над поверхнею з штучними хвилями збільшується в 70 разів ( $s = 0,5$  та  $s = 35$  відповідно). Причому, експерименти в басейні проводились при відсутності вітру.

Результати експериментів входять у протиріччя усталеному погляду натуралістів про вплив вітру на випаровування з природних водоймищ. Наприклад, загальноновживана формула Шулейкіна В.В. (5) [35], де при зростанні вітру в 10 разів, швидкість випаровування зростає теж точно у 10 разів, а за швидкості вітру 0 м/с (стан поверхні повний штиль) випаровування повинно припинитись, що безумовно не відповідає дійсності.

$$Q = cW (E - e), \tag{5}$$

де  $Q$  - швидкість випаровування (г / (с м<sup>2</sup>),  $E$  - тиск насиченої пари (гПа) при температурі поверхні, що випаровує (в даному випадку температуру вимірюють на глибині 0,5 – 1 м, що не є правильним),  $e$  - парціальний тиск водяної пари (гПа),  $c$  - коефіцієнт, що залежить від висоти, на якій вимірюється парціальний тиск водяної пари,  $W$  - швидкість вітру (м / с).

Як бачимо, процес випаровування потребує детального аналізу. Важливо розуміти, що випаровування включає і розбризкування (так зване, механічне випаровування за М.М. Зубовим, рис.2), причому оцінка його частки, в порівнянні з часткою фазових переходів води, так само є дискусійною.

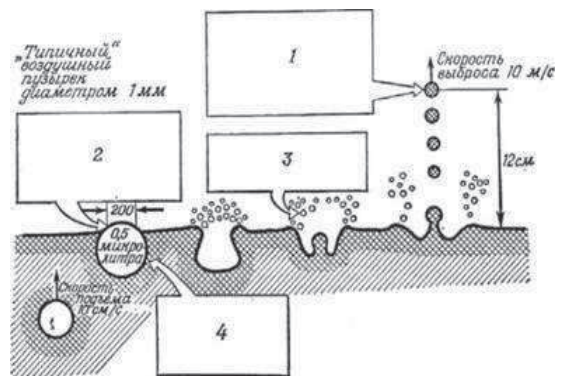


Рис. 2 – Схематичне зображення процесу лускання повітряної бульбашки на поверхні води (процес «механічного» випаровування) [42].

Експериментально встановлено, що при розриві бульбашки з поверхні моря в атмосферу викидаються краплі двох видів: дрібні, що є залишками поверхневої плівки бульбашки, яка контактувала з атмосферою, і більші "реактивні", що вилітають з дна бульбашки. Реактивні краплі, які мають велику масу, незабаром падають назад, в той час як значно менші за розмірами плівкові краплі

підхоплюються вітром. Одночасно плівкові краплі є тим основним матеріалом, з якого формуються морські аерозолі. За розрахунками [43] кількість солі, що потрапляє в атмосферу, на 1 – 2 порядки більше, ніж це могло б бути при класичному фізичному випаровуванні.

Таким чином, саме розбризкування з наступним випаровуванням з крапельок води в атмосфері, а не процес вилітання найбільш енергоактивних молекул, є найбільш інтенсивним процесом, який доставляє воду в атмосферу. Тільки цим можна пояснити різницю у приведених вище результатах теоретичних сентенцій і розрахунків та експериментальних даних, що стосуються процесу фізичного випаровування води. Фізичне випаровування можливе лише як результат витягування молекул при дефіциті парціального тиску парів води в атмосфері по типу роботи пілососа (вакуумізації). При цьому квазі-кристалічні структури skin - шару порушуються. Вони порушуються також і в процесі «механічного» випаровування. На нашу думку, саме на відновлення структурованої поверхневої плівки (skin - шару), яка викидається бульбашками в повітря, або порушується при витягуванні молекул води з квазі-кристалічної молекулярної решітки, і забирається енергія; і саме ці процеси, а не випаровування в класичному розумінні, підсилюють від'ємну температурну аномалію поверхневого шару, яка сформувалася за рахунок незбалансованості процесів поглинання сонячного тепла та випромінювання.

#### Формування газових бульбашок у морській воді та їх значення

Залишається розглянути кількісні характеристики та особливості знаходження газів у морській воді. За нашими даними у skin - шарі концентрація газів, як мінімум, вдвічі вища їх концентрації в об'ємі. Концентрація газів, виділених з тонкого поверхневого шару складала 68 мг/дм<sup>3</sup>, в той час як концентрація газів в пробах води, відібраних на п'ять сантиметрів нижче від поверхні, – 29 мг/дм<sup>3</sup>. Різкий вертикальний градієнт концентрації газів (більш ніж 8 мг/дм<sup>3</sup> на 1 см) обумовлений декількома причинами: підвищенням температури з глибиною, збільшенням солоності під skin-шаром (тобто, зниженням розчинності газів відповідно до закону Генрі - Дальтона). Дуже важливими є процеси розповсюдження газових бульбашок в тонких поверхневих шарах води у зв'язку з інверсійним розподіленням температури в цьому шарі [5]. Гегузіт Я.Є. [44] виявив, що на бульбашку газу в рідині, крім сили виштовхування, діє сила, що обумовлена перепадом температури, причому, ці сили для певного діаметру бульбашки можуть врівноважуватись. Як наслідок, газові бульбашки в цих умовах можуть зависати у рідині. Встановлено, що рух бульбашки, при інших рівних умовах, направлений в бік

збільшення температури, і бульбашка при піднятті до поверхні океану, потрапляючи в більш холодний skin – шар, в залежності від розміру, уповільнює підняття чи навіть зупиняється. Це в кінцевому ефекті може приводити до накопичення вільної газової фази в поверхневому мікрошарі, чи під ним, що підтверджується.

Стан газової фази у морській воді (розчин чи вільний стан у вигляді бульбашок різного діаметру) відповідно до закону Генрі – Дальтона залежить від тиску, температури, солоності та інших факторів, що змінюються в часі. Наприклад, в результаті зміни тиску в поверхневих шарах води за рахунок хвилювання, відбувається періодична дегазація перенасиченого газами розчину і, за даними А.А. Безбородова, Єремєєва В.Н. [43], на кожному квадратному сантиметрі морської поверхні кожна секунду можуть руйнуватись біля 30 мікробульбашок. Крім цього, присутність газу у воді робить її більш структурно впорядкованою. Таким чином, в ПМШ океану спостерігається підвищене накопичення газів як в розчиненому, так і у вільному стані, що, не дивлячись на різницю процесів накопичення газів та стану їх знаходження, знижує густину води у цьому шарі. Більш низькі температури skin – шару морської води мають теж дуже велике значення для густини цього шару. Зміни густини поверхневого шару води, що пов'язані з температурою, абсолютно відрізняються від того, що звичайно спостерігається в об'ємі води: зі зниженням температури густина тонких поверхневих шарів води зменшується, а не збільшується (при 20°C вона приблизно на 15% менше густини об'ємної води, а при 0°C – на 25%). Однак, товщина цих шарів невелика і змінна, і збільшується при зниженні температури в декілька і більше разів [32].

#### Висновки та рекомендації

1. Можна вважати доведеним, що skin – шар є постійно існуючим природним утворенням на поверхні гідросфери, який має відносно низьку солоність, низьку температуру, особливу пограничну структуру, високу газонасиченість, завдяки яким вода стає ще більш структурно впорядкованою (квазікристалічною) та легшою. Цей шар виконує функції саморегулювання енерго- та масообміну між океаном та атмосферою в бік зменшення взаємодії, тобто приводить систему океан – атмосфера до стану мінімально можливої (при даних умовах) ентропії.

2. Завдяки особливостям структури skin – шару створюються умови накопичення вільної газової фази, яка безумовно повинна впливати на показники температури в НВЧ – діапазоні, адже відмінності в радіояскравісній температурі земних об'єктів визначаються в основному їх випромінювальною здатністю, а не фізичною температурою. Радіотеплове випромінювання води, як і інфратеплове, формується поверхневим випромінювальним шаром, товщина

якого тим більша, чим довша хвиля випромінювання. А інтенсивність радіотеплового випромінювання характеризується так званою радіояскравісною температурою, тобто добутком абсолютної температури і коефіцієнта випромінювання. Величина коефіцієнта випромінювання в радіодіапазоні значно варіює залежно від електричних властивостей (а значить від солоності, присутності вільної газової фази), структури та характеру поверхні об'єкта.

3. Моніторинг температури водної поверхні та температури атмосферних опадів у рідкому стані та створення програмного забезпечення з обробки даних супутникового моніторингу може бути вдосконаленим, якщо буде враховано ефекти виникнення skin – шару на водній поверхні та на поверхні крапель дощу. Це має дуже велике значення для прогнозування умов переходу крапель дощу в твердий стан (град). Якщо температура об'єму водного об'єкта відрізняється від температури його поверхневого мікрошару, то температура дощових крапель, які фактично сформовані цим шаром, в повній мірі можуть бути оцінені радіояскравісною температурою. Такий ефект може погіршуватися в умовах збільшення розмірів дощових крапель.

4. При отриманні температури поверхневого мікрошару океану дистанційними методами в ІЧ та НВЧ діапазонах слід враховувати, що це та температура, яка характеризує океан як результат його взаємодії з атмосферою. Таким чином, не існує потреб в знаходженні коефіцієнтів перерахунку температури skin – шару в термодинамічну температуру об'єму води, яка не має безпосереднього обміну з атмосферою за рахунок постійного існування на поверхні гідросфери стійкого мікрошару.

5. Визначення еталону радіояскравісної температури морської води та визначення його співвідношення з еталоном термодинамічної температури води буде залежати від багатьох чинників, часто невизначених. Точна функція переходу від радіояскравісної температури води (плівкова енергетична характеристика) до термодинамічної температури (об'ємна температура) в світлі проведених вище досліджень та теоретично не може існувати.

#### Список літератури

1. **Wentz, F. J.** Satellite measurements of sea-surface temperature through clouds / **F. J. Wentz, C. L. Gentemann, D. K. Smith, D. B. Chelton** // *Science*. – 2000. – No 288. – P. 847-850. – doi: 10.1126/science.288.5467.847.
2. **Stammer, D.** Validation of new microwave SST for climate purposes / **D. Stammer, F. J. Wentz, C. L. Gentemann** // *J. Clim.* – 2003. – No 16. – P. 73-87.
3. **Chelle, C. L.** Accuracy of satellite sea surface temperatures at 7 and 11 GHz / **C. L. Chelle, T. Meissner, F.J. Wentz** // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2010. – 48. – P. 1009-1018. – doi: 10.1109/TGRS.2009.2030322
4. Режим доступу: shakaru.eorc.jaxa.jp/YSMaP/index\_j.htm.
5. **Бубукин, И. Т.** Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне / **И. Т. Бубукин, К. С. Станкевич** // *Радиотехника и электроника*. – 2012. – Т.57. No 10. – С. 1089-1098.
6. **Ландау, Л. Д.** Статистическая физика. Теоретическая физика / **Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц** // Т. V. Из-во «Наука». М. – 1964. – 520 с.
7. Режим доступу: <http://russbeer.ru/encwater/thermal>.
8. Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского «Радиолокационное исследование природных сред» // *Решение XXVII всероссийского симпозиума*. Санкт-Петербург. – 2011. – 6 с.
9. **Вершинский, Н. В.** О вертикальной микроструктуре тонкого поверхностного слоя океана / **Н. В. Вершинский, Ю. А. Волков, А. В. Соловьев** // Доклады АН СССР. – 1981. – № 3. – С. 632-636.
10. **Гинзбург, А. И.** Лабораторные исследования тонкой структуры термического слоя в воде у поверхности раздела вода-воздух / **А. И. Гинзбург, А. Г. Зацепин, К. Н. Федоров** // *Мезомаштабная изменчивость поля температуры в океане*. – 1977. – С. 38-45.
11. Режим доступу: <http://neosee.ru/509059>.
12. **Товбин, М. В.** О температуре на поверхности раздела водоем-воздух / **М. В. Товбин** // *Труды института. Институт гидробиологии АН УССР*. – 1949. – № 24.
13. **Хунджуа, Г. Г.** О структуре поверхностной холодной пленки океана и теплообмене океана с атмосферой / **Г. Г. Хунджуа, А. М. Гусев, Е. Г. Акуреев** и др. // *Изв. АН СССР. ФАО*. – 1977. – Т. 13. № 7. – С. 753-758.
14. **Ball, F. K.** Sea surface temperatures / **F. K. Ball** // *Australian J. Phys.* – 1954. – No 7. – P. 649-652.
15. **Busch, N. E.** The surface boundary layer. Boundary – *Layer Met.* – 1973. – No 4. – P. 213-240.
16. **Fairall, C. W.** Cool-skin and warm layer effects on sea surface temperature / **C. W. Fairall, E. F. Bradley, J. S. Godfrey, G. A. Wick, J. B. Edson, G. S. Young** // *J. Geophys. Res.* – 1996. – No 101(C1). – P. 1295-1308.
17. **McKeown, W.** Sounding the skin of water: Sensing air-water interface temperature gradients with interferometry / **W. McKeown, F. Bretherton, H. L. Huang, W. L. Smith, H. E. Revercomb** // *J. Atmos. Oceanic Technol.* – 1995. – No 12. – P. 1313-1327.
18. **Cimini, D.** Air temperature profile and air/sea temperature difference measurements by infrared and microwave scanning radiometers / **D. Cimini, J. A. Shaw, E. R. Westwater, Y. Han, V. Irisov, V. Leuski, J. H. Churnside** // *Radio science*. – 2003. – Vol. 38, No. 3. – 8045 p. – doi:10.1029/2002RS002632, 2003.
19. **Зубов, Н. Н.** Замечательный случай образования льда / **Н. Н. Зубов** // *Метеорологический вестник*. М. – 1934.
20. **Kucherenko, N. V.** To new understanding to ocean – atmosphere system interaction by means of skin-layer studying / **N. V. Kucherenko** / *France, International 90 Cetinje conference; [AMSE]; Modelling, simulation and control*. – 1991. – V. 25, No 4. – P. 1-10.
21. **Гинзбург, А. И.** О вкладах солёности и температуры в конвективную неустойчивость при испарении морской воды / **А. И. Гинзбург, К. Н. Федоров** // *Изв. АН СССР. ФАО*. – 1979. – № 8. – С. 886-890.
22. **Кучеренко, Н. В.** Некоторые аспекты термодинамики на границе раздела океан-атмосфера / **Н. В. Кучеренко** / Киев, університет Укр. НІИНТТИ. – 1988. – С. 44-48.
23. **Савенко, В. С.** Химия водного поверхностного микрослоя / **В. С. Савенко** // Л.: Гидрометеоздат. – 1990. – 184 с.



24. **Кучеренко, Н. В.** О роли микроконвекции в ПМС океана / **Н. В. Кучеренко** // *IV Всесоюзная конференция молодых ученых по океанологии и гидрологии. Геофизика. – Севастополь: Тезисы докладов.* – 1989. С. 14-16.
25. **Куфтарков, Ю. М.** О холодном температурном скин – слое океана / **Ю. М. Куфтарков, Б. А. Нелепо, А. Д. Федоровский** // *Изв. АН СССР. ФАО.* – 1978. – Т.14, №1 – С. 88-93.
26. **Федоров К.Н., Власов В.Л., Амбросимов А.К., Гинзбург А.И.** Исследование поверхностного слоя испаряющейся морской воды методом оптической интерферометрии / **К. Н. Федоров, В. Л. Власов, А. К. Амбросимов, А. И. Гинзбург** // *Изв. АН СССР. ФАО.* – Т.15, № 10. – С. 1067-1075.
27. **Федоров, К. Н.** Явления на поверхности океана по визуальным наблюдениям / **К. Н. Федоров, А. И. Гинзбург** // *Океанология.* – 1986. – Т. XXVI, № 1. – С. 3-9.
28. **Федоровский, А. Д.** Гидротермодинамика приповерхностного слоя жидкости и оптические методы ее исследования / **А. Д. Федоровский, Е. И. Никифорович** // *Вестник АН УССР.* – 1984. – № 11.
29. **Башкиров, Г. С.** Исследование некоторых физических явлений поверхностного микрослоя / **Г. С. Башкиров, Н. В. Кучеренко** // *М. Рук. деп. в ВИНТИ.* – 1989. – № 2057 – В89.
30. **Башкиров, Г. С.** О возможности устойчивой стратификации поверхностного микрослоя и его влияние на регулирование тепломасообмена в системе океан-атмосфера / **Г. С. Башкиров, Н. В. Кучеренко** // *Сб. Метеорология, климатология гидрология. Одеса: ОГМИ.* – 1988. – № 24. – С. 64-68.
31. **Хорн Р.** Морская химия: Пер. с англ. – М., Наука. – 1972. – 400 с.
32. **Хабаров, В. Н.** Автоадсорбция и поверхностная энтропия жидкостей / **В. Н. Хабаров, А. И. Русанов, Н. Н. Кочуров** // *Коллоидный журнал.* – 1976.
33. Таблицы физических величин. – М.: Изд-во Наука. – 1983. – 693 с.
34. Режим доступа: <http://underwater.su/books/item>.
35. **Жуков, А. А.** Общая океанология. – Л.: Гидрометеиздат. – 1976. – 376 с.
36. **Егоров, Н. И.** Физическая океанография. – Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 455 с.
37. **Перри, А. Х.** Система океан – атмосфера / **А. Х. Перри, Дж. М. Уокер** // Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 138 с.
38. **Казьмин, А. С.** О влиянии пленки нефти на термическую структуру приповерхностного слоя воды / **А. С. Казьмин** // *Изв. АН СССР. ФАО.* – 1983. – Т.19, № 10. – С. 1075-1081.
39. **Westwater, E. R.** Sea-air and boundarylayer temperatures measured by a scanning 5-mm-wavelength radiometer: Recent results / **E. R. Westwater, Y. Han, V. G. Irisov, V. Y. Leusky, Y. G. Trokhimovski, C. W. Fairall, A. Jessu** // *Radio Sci.* – 1998. – No 33(2). – P. 291-302. – doi: 10.1029/97RS02747.
40. Режим доступа: <http://chem21.info/info/1326987/>.
41. Режим доступа: <http://www.mpsisystem.ru/arhiv/>.
42. Режим доступа: [http://pidruchniki.com/2015073065472/ekologiya/gidrosf\\_](http://pidruchniki.com/2015073065472/ekologiya/gidrosf_).
43. **Безбородов, А. А.** Физико-химические аспекты взаимодействия океана и атмосферы / **А. А. Безбородов, В. Н. Еремеев** // Киев: Наукова думка. – 1984. – 191 с.
44. **Гегузин, Н. Е.** Пузыри. – М.: Наука. – 1985. – 173 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Wentz, F. J., Gentemann, C. L., Smith, D. K., Chelton, D. B.** Satellite measurements of sea-surface temperature through clouds, *Science*, 2000, **288**, 847-850, doi: 10.1126/science.288.5467.847.
2. **Stammer, D., Wentz, F. J., Gentemann, C. L.** Validation of new microwave SST for climate purposes, *J. Clim.*, 2003, **16**, 73-87.
3. **Chelle, C. L., Meissner, T., Wentz, F.J.** Accuracy of s Gentemann, atellite sea surface temperatures at 7 and 11 GHz, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**, 1009-1018, doi: 10.1109/TGRS.2009.2030322.
4. Web: [shakaru.eork.jaxa.jp/YSMaP/index\\_j.htm](http://shakaru.eork.jaxa.jp/YSMaP/index_j.htm)
5. **Bubukin, I. T., Stankevich, K. S.** Struktura poverhnostnoj plenki morskoj poverhnosti po naturnym izmerenijam v IK-diapazone. *Trudy XXIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii po "Rasprostranjeniju radiovoln"*, 2011, 161 -164.
6. **Landau, L. D., Lifshic, E. M.** Statisticheskaja fizika. Teoreticheskaja fizika. Moskow, Nauka, 1964, **V**, 520 p.
7. Web: <http://russbeer.ru/encwater/thermal>.
8. Voenno-kosmicheskaja akademija im. A.F. Mozhajskogo «Radiolokacionnoe issledovanie prirodnyh sred». *Reshenie XXVII vserosijs'kogo simpoziuma*. 2011, 6 p.
9. **Vershinskij, N. V., Volkov, Ju. A., Solov'ev, A. V.** O vertikal'noj mikrostrukture tonkogo poverhnostnogo sloja okeana. *Doklady AN SSSR*, 1981, **3**, 632-636.
10. **Ginzburg, A. I., Zacepin, A. G., Fedorov, K. N.** Laboratornye issledovanija tonkoj struktury termicheskogo sloja v vode u poverhnosti razdela voda-vozduh. *V kn.: Mezomashtabnaja izmenchivost' polja temperatury v okeane*. 1977, 38-45.
11. Web: <http://neosee.ru/509059>.
12. **Tovbin, M. V.** O temperature na poverhnosti razdela vodoem-vozduh. *Trudy instituta/ Institut gidrobiologii AN USSR*, 1949, **24**.
13. **Hundzhuu, G. G., Gusev, A. M., Akureev, E. G. i dr.** O strukture poverhnostnoj holodnoj plenki okeana i teploobmene okeana s atmosferoj. *Izv. AN SSSR. FАО*. 1977, **13(7)**, 753-758.
14. **Ball, F. K.** Sea surface temperatures. *Australian J. Phys.*, 1954, **7**, 649-652.
15. **Busch, N. E.** The surface baundery layer. *Baundery – Layer Met.*, 1973, **4**, 213-240.
16. **Fairall, C. W., Bradley E. F., Godfrey J. S., Wick G. A., Edson J. B., Young G. S.** Cool-skin and warm layer effects on sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101(C1)**, 1295-1308.
17. **McKeown, W., Bretherton, F., Huang, H. L., Smith, W. L., Revercomb, H. E.** Sounding the skin of water: Sensing air-water interface temperature gradients with interferometry, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1995, **12**, 1313-1327.
18. **Cimini, D., Shaw, J. A., Westwater, E. R., Han, Y., Irisov, V., Leuski, V., Churnside, J. H.** Air temperature profile and air/sea temperature difference measurements by infrared and microwave scanning radiometers. *Radio Science*, 2003, **38(3)**, 8045, doi:10.1029/2002RS002632.
19. **Zubov, N. N.** Zamechatel'nyj sluchaj obrazovanija l'da. *Meteorologicheskij vestnik*. Moskow, 1934.
20. **Kucherenko, N. V.** To new understanding to ocean – atmosphere system interaction by means of skin-layer studying. *International 90 Cetinje conference; [AMSE]; Modelling, simulation and control*, 1991, **25(4)**, 1-10.

21. **Ginzburg, A. I., Fedorov, K. N.** O vkladah solenosti i temperatury v konvektivnuju neustojchivost' pri isparenii morskoy vody. *Izv. AN SSSR. FAO*, 1979, **8**, 886-890.
22. **Kucherenko, N. V.** Nekotorye aspekty termogidrodinamiki na granice razdela okean-atmosfera. Kiev, universitet, 1988. Ukr. NIINTTI, 44-48.
23. **Savenko, V. S.** Himija vodnogo poverhnostnogo mikrosloja. Gidrometeoizdat, 1990, 184 p.
24. **Kucherenko, N. V.** O roli mikrokonvekcii v PMS okeana. *IV Vsesojuznaja konferencija molodyh uchenyh po okeanologii i gidrologii. Geofizika. Sevastopol': Tezisy dokladov*, 1989, 14-16.
25. **Kuftarkov, Ju. M., Nelepo, B. A., Fedorovskij, A. D.** O holodnom temperaturnom skin – sloe okeana. *Izv. AN SSSR. FAO*. 1978, 14(1), 88 -93.
26. **Fedorov, K. N., Vlasov, V. L., Ambrosimov, A. K., Ginzburg, A. I.** Issledovanie poverhnostnogo sloja isparjajushhejsja morskoy vody metodom opticheskoy interferometrii. *Izv. AN SSSR. FAO*, **15**(10), 1067-1075.
27. **Fedorov, K. N., Ginzburg, A. I.** Javlenija na poverhnosti okeana po vizual'nym nabljudenijam. *Okeanologija*. 1986, **XXVI**(1), 3-9.
28. **Fedorovskij, A. D., Nikiforovich, E. I.** Gidrotermodinamika pripoverhnostnogo sloja zhidkosti i opticheskie metody ee issledovanija. *Vestnik AN USSR*, 1984, 11.
29. **Bashkirov, G. S., Kucherenko, N. V.** Issledovanie nekotoryh fizicheskikh javlenij poverhnostnogo mikrosloja. Moskov, VINITI, 1989, № 2057 – V89.
30. **Bashkirov, G. S., Kucherenko, N. V.** O vozmozhnosti ustojchivoj stratifikacii poverhnostnogo mikrosloja i ego vlijanie na regulirovanie teplomasobmena v sisteme okean-atmosfera. *Sb. Meteorologija, klimatologija gidrologija*. Odesa: OGMI, 1988, **24**, 64-68.
31. **Horn, R.** Morskaja himija: Per. s angl. Moskov, Nauka, 1972, 400 p.
32. **Habarov, V. N., Rusanov, A. I., Kochurov, N. N.** Avtoadsorbicija i poverhnostnaja jentropija zhidkостей. *Kolloidnyj zhurnal*. 1976.
33. Tablicy fizicheskikh velichin. Moskov: Izd-vo Nauka, 1983, 693 p.
34. Web: <http://underwater.su/books/item>.
35. **Zhukov, A. A.** Obshhaja okeanologija. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 376 p.
36. **Egorov, N. I.** Fizicheskaja okeanografija. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 455 p.
37. **Perri, A. H., Uoker Dzh M.** Sistema okean – atmosfera. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 138 p.
38. **Kaz'min, A. S.** O vlijanii plenki nefi na termicheskuju strukturu protipoverhnostnogo sloja vody. *Izv. AN SSSR. FAO*. 1983, **19**(10), 1075-1081.
39. **Westwater, E. R., Han, Y., Irisov, V. G., Leusky, V. Y., Trokhimovski, Y. G., Fairall, C. W., Jessu, A.** Sea-air and boundarylayer temperatures measured by a scanning 5-mm-wavelengthradiometer: Recent results, *Radio Sci.*, 19998, **33**(2), 291-302, doi: 10.1029/97RS02747.
40. Web: <http://chem21.info/info/1326987/>.
41. Web: <http://www.mpisystem.ru/arhiv/>.
42. Web : <http://pidruchniki.com/2015073065472/ekologiya>
43. **Bezbodov, A. A., Ereemeev, V. N.** Fiziko-himicheskie aspekty vzaimodejstvija okeana i atmosfery. Kiev: Naukova dumka, 1984, 191 p.
44. **Geguzin, N. E.** Puzyri. Moskov: Nauka, 1985, 173 p.

## Відомості про авторів (About authors)

**Михайлов Валерій Іванович** – доктор географічних наук, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна, e-mail: [tsb1@ukr.net](mailto:tsb1@ukr.net)

**Mikhailov Valery** - Doctor of Geographical Sciences , Senior Researcher , Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " c. Odessa, Ukraine. e-mail: [tsb1@ukr.net](mailto:tsb1@ukr.net).

**Кучеренко Наталія Василівна** – кандидат географічних наук, провідний науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна, e-mail: [tsb1@ukr.net](mailto:tsb1@ukr.net)

**Kucherenko Natalia** - Candidate of Geographical Sciences , Senior Researcher , Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " c. Odessa, Ukraine , e-mail: [tsb1@ukr.net](mailto:tsb1@ukr.net)

**Барган Оксана Георгіївна** - молодший науковий співробітник, Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», м. Одеса, Україна, e-mail: [0033ksuxa0033@gmail.com](mailto:0033ksuxa0033@gmail.com)

**Bargan Oksana** - Junior Researcher , Research Center of the Armed Forces of Ukraine " State Oceanarium " c. Odessa, Ukraine, e-mail: [0033ksuxa0033@gmail.com](mailto:0033ksuxa0033@gmail.com)

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Михайлов, В.І.** Теоретичні проблеми застосування ІЧ та НВЧ радіометрії на прикладі супутникового проекту NASA – JAXA / **В. І. Михайлов, Н. В. Кучеренко, О. Г. Барган** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 138-146. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.21.

Please cite this article as:

**Mikhailov, V., Kucherenko, N., Bargan, O.** Theoretical problems of application of infrared and microwave radiometry on the example of NASA– JAXA satellite project. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 138-146, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.21.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Михайлов, В.И.** Теоретические проблемы применения ИЧ и СВЧ радиометрии на примере спутникового проекта NASA – JAXA / **В. И. Михайлов, Н. В. Кучеренко, О. Г. Барган** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 138-146. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.21.

**АННОТАЦИЯ** Рассматривается проблема соответствия данных о температуре воды в жидком состоянии, полученной дистанционными методами за счет излучения, и температуры, полученной контактно, т.е. термодинамической температуры.

**Ключевые слова:** skin – слой воды, радиояркая температура, термодинамическая температура, спутниковые методы, инфракрасное излучение.

Надійшла (received) 12.06.2016

## ОЦЕНКА ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВОМ КАДРЕ ДЛЯ ДЛИННОФОКУСНЫХ И КОРОТКОФОКУСНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

А. В. ПОГОРЕЛОВ<sup>1\*</sup>, В. Е. САВАНЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Ужгородский национальный университет, Ужгород, УКРАИНА

\*email: pogartem@rambler.ru

**АННОТАЦИЯ** В статье разработаны вычислительные методы определения экваториальных координат небесных объектов по оценке их положения на цифровом кадре. Разработанные методы учитывают особенности астрономической редукции в длиннофокусных и короткофокусных оптических системах. Для каждой из них проведен сравнительный анализ точности положения объектов в случае применения рассмотренных методов. Результаты анализа показали обоснованность применения методов прямой координатной редукции для кадров, полученных с использованием длиннофокусных оптических систем, и обратной для кадров из короткофокусных оптических систем.

**Ключевые слова:** цифровой кадр, небесный объект, астрономические наблюдения, оценка показателей точности, оптические системы, астроредукция

## ASSESSMENT OF OBJECTS EQUATORIAL COORDINATES ON THE DIGITAL FRAMES FOR LONG-FOCUS AND SHORT-FOCUS TELESCOPES

A. POHORELOV<sup>1\*</sup>, V. SAVANEVYCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Uzhhorod National University, Uzhhorod, UKRAINE

**ABSTRACT** Computational methods for determining equatorial coordinates of celestial objects based on an assessment of their positions on the digital frame are described. These methods are based on the possibility of representing errors in celestial objects positions mappings in the form of reduction equation which depends only on the object's location in the frame. To assess the coefficients of the reduction model the modified Levenberg-Marquardt algorithm was used that allowed to eliminate the problem with accumulation of computational errors for ill-conditioned matrix of reduction model partial derivatives. The developed methods take into account the peculiarities of astronomical reduction in long-focus and short-focus optical systems. These systems have different types of optical aberrations that negatively affect accuracy of objects positions determination that leads to the problem of choosing optimal model for each one. With using of digital images obtained from both types of optical systems the comparative analysis of the accuracy of the position of objects in case of application of considered methods have been carried out. As the investigated objects in the analysis the set of reference stars as well as stars identified with UCAC4 have been used. The results showed reasonableness of applying direct coordinate reduction methods for frames obtained by using long-focus optical systems. According to the analysis results for short-focus optical systems it is advisable to use the reverse coordinate reduction methods.

**Keywords:** digital frame, celestial object, astronomical observations, assessment of accuracy metric, optical systems, astroreduction

### Введение

Основная часть астрономических данных получается с использованием автоматизированных астрономических систем. Эти данные получают с определенными характеристиками. Они включают в себя фокусное расстояние, полосу спектра и параметры сенсора. В зависимости от используемого фокусного расстояния, можно разделить оптические системы на короткофокусные и длиннофокусные [1].

Этим системам свойственны разные типы оптических аберраций, которые негативно влияют на качество изображений [2] и передаточные характеристики оптических систем. Поэтому для точных астрономических измерений (астрометрии, фотометрии) на всём поле зрения телескопа очень важно проводить астрономическую редукцию с

учетом особенностей используемой оптической системы.

### Анализ литературы

В работах [3÷5] рассматриваются методы оценки параметров местоположения объектов на цифровых изображениях. Представленные методы позволяют оценить положение объектов с учетом наклонной помеховой подложки. Результаты ряда экспериментов по анализу точности оценки местоположения объектов приведены в работах [3, 6]. Однако, методики оценки экваториальных координат по полученным параметрам объекта на цифровом изображении представлены не были.

Вопросы оценки экваториальных координат объектов поднимаются в работе [7]. Одним из основных недостатков данной работы является то, что

рассматриваемый метод не учитывает особенностей оптических систем телескопов с разным фокусным расстоянием. В рамках проведенных исследований представлена зависимость среднеквадратической оценки экваториальных координат и количества отождествленных звезд от модели постоянных пластинок. В тоже время, методики получения результатов не были подробно изложены. Так же к недостаткам данной работы можно отнести использование в качестве опорного звездного каталога USNOB1.0 [8], который по своей точности уступает используемому в данной работе каталогу UCAC4 [9].

### Цель работы

Целью статьи является разработка вычислительных методов определения экваториальных координат объектов по оценке их положения на цифровом кадре, приближительных экваториальных координатах оптического центра кадра, а так же достаточного количества опорных звезд.

### Постановка задачи

Результаты наблюдений телескопа [1] отображены на цифровом кадре [2]. С использованием специальных методов измерены положения объектов [7] на цифровом кадре и отобраны опорные звезды [10]. Известны их координаты в системе координат цифрового кадра и яркость соответствующих им изображений. В используемом опорном звездном каталоге найдены соответствующие им объекты.

Для произвольно выбранной звезды  $S$ , известны её экваториальные координаты  $(\alpha, \delta)$  [11]. Из заголовка цифрового кадра получена информация о приближительных экваториальных координатах его центра  $(\alpha_0, \delta_0)$ . В связи с влиянием атмосферы [12], а так же искажениями [13, 14, 15], вносимыми оптической системой телескопа, координаты звезды  $(x, y)$  в системе координат цифрового кадра [2] не совпадают с идеальными координатами  $(\xi, \eta)$ , полученными по формулам центральной проекции [17]. При этом предполагается, что ошибки в отображении положения небесных объектов на цифровом кадре используемого телескопа возможно учесть в форме редуционного уравнения [18], зависящего только от расположения объекта на кадре.

На основании рассмотренных исходных данных необходимо оценить экваториальные координаты объектов. Разрабатываемый метод должен учитывать особенности длиннофокусных и короткофокусных оптических систем.

### Прямая модель редукции

Идеальные координаты  $i$ -го небесного объекта на цифровом кадре можно получить [18] согласно формулам сферической тригонометрии по его экваториальным координатам  $(\alpha_i, \delta_i)$  и с использованием известных экваториальных координат оптического центра кадра  $(\alpha_0, \delta_0)$ :

$$\begin{cases} \xi_i = \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}; \\ \eta_i = \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}. \end{cases} \quad (1)$$

Аналогично можно получить экваториальные координаты точки с известными идеальными координатами [18,19]:

$$\begin{cases} \alpha_i = \alpha_0 + \arctg\left(\frac{-\xi_i}{\cos \delta_0 - \eta_i \sin \delta_0}\right); \\ \delta_i = \arcsin \frac{\eta_i \cos \delta_0 + \sin \delta_0}{\sqrt{1 + \xi_i^2 + \eta_i^2}}. \end{cases} \quad (2)$$

В общем случае система координат цифрового кадра отличается от идеальной (из-за аббераций телескопа) [20], поэтому необходимо преобразовать полученные координаты в систему координат телескопа, с учетом ее отличия от идеальной. Между плоскими идеальными и сферическими экваториальными координатами существует однозначное соответствие, которое выражается формулами (1), (2). Таким образом, задача определения экваториальных координат объекта при известных его прямоугольных координатах в системе координат цифрового кадра можно свести к оценке зависимости между координатами объектов в двух прямоугольных системах координат (СК): СК кадра  $(x, y)$  и идеальной СК  $(\xi, \eta)$ .

Первоначально, из априорных соображений, задается вид этой модели. В простейшем случае, рассматриваемая модель сводится к линейному преобразованию [21]:

$$\begin{cases} \xi_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i; \\ \eta_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициенты системы уравнений (3) задают зависимость между идеальной системой координат и системой координат цифрового кадра. Поэтому выражение (3) называют уравнением связи. В рамках астрометрии для их обозначения широко используется термин «постоянные пластинок» [11]. Впервые термин появился во времена применения в астрометрии фотографических пластинок. Несмотря на прекращение их использования, термин сохранился, и в наши дни употребляется для обозначения коэффициентов редуционных уравнений цифровых кадров [22].

Известными величинами в системе уравнений (3) являются идеальные  $(\xi_i, \eta_i)$  и прямоугольные  $(x_i, y_i)$  координаты  $i$ -й опорной звезды. Требуется найти вектор коэффициентов постоянных пластинок:

$$\theta = \{\theta_x, \theta_y\}, \quad (4)$$

в котором:

$$\theta_x = \{a_0, a_1, \dots, a_p\}, \quad (5)$$

$$\theta_y = \{b_0, b_1, \dots, b_p\}, \quad (6)$$

где  $p$  – количество используемых коэффициентов.

Однако модель (3) имеет ряд недостатков. Прежде всего, она применима только к телескопам с небольшим полем зрения (не более 20 угловых минут) или с использованием небольших участков поля зрения телескопа. Наличие только линейных членов делают её чувствительной к любым искажениям изображения. По этим причинам применение приведенной модели целесообразно только в случае определения координат объекта, находящегося в центре кадра.

Для определения координат на всем кадре иногда используют квадратичную модель [7]:

$$\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2; \quad (7)$$

$$\eta_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2; \quad (8)$$

Чаще используют модели и более высоких порядков, например, кубическую [7]:

Оценка среднего отклонения оценок экваториальных координат объектов в  $l$ -том сегменте определялось согласно выражениям:

$$\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3; \quad (9)$$

$$\eta_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^3 + b_7x_i^2y_i + b_8x_iy_i^2 + b_9y_i^3. \quad (10)$$

или модель с полиномом пятой степени:

$$\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3 + a_{10}x_i^4 + a_{11}x_i^3y_i + a_{12}x_i^2y_i^2 + a_{13}x_iy_i^3 + a_{14}y_i^4 + a_{15}x_i^5 + a_{16}x_i^4y_i + a_{17}x_i^3y_i^2 + a_{18}x_i^2y_i^3 + a_{19}x_iy_i^4 + a_{20}y_i^5; \quad (11)$$

$$\xi_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^3 + b_7x_i^2y_i + b_8x_iy_i^2 + b_9y_i^3 + b_{10}x_i^4 + b_{11}x_i^3y_i + b_{12}x_i^2y_i^2 + b_{13}x_iy_i^3 + b_{14}y_i^4 + b_{15}x_i^5 + b_{16}x_i^4y_i + b_{17}x_i^3y_i^2 + b_{18}x_i^2y_i^3 + b_{19}x_iy_i^4 + b_{20}y_i^5. \quad (12)$$

Для определения коэффициентов постоянных пластинок достаточно наличия шести (квадратичная), десяти (кубическая) или двадцати одной (модель с полиномом пятой степени) опорных звезд (количество уравнений определяется количеством

неизвестных). Однако наличие ошибок снижает точность полученных коэффициентов. Поэтому для их вычисления выбирают существенно избыточную совокупность опорных звезд [10] и для каждой звезды записывают такую пару уравнений, а затем решают полученную избыточную систему уравнений метода наименьших квадратов (МНК) [23]:

$$\begin{cases} \xi_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 + a_3x_1^2 + a_4x_1y_1 + a_5y_1^2 + a_6x_1^3 + a_7x_1^2y_1 + a_8x_1y_1^2 + a_9y_1^3; \\ \vdots \\ \xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^3 + a_7x_i^2y_i + a_8x_iy_i^2 + a_9y_i^3; \\ \vdots \\ \xi_n = a_0 + a_1x_n + a_2y_n + a_3x_n^2 + a_4x_ny_n + a_5y_n^2 + a_6x_n^3 + a_7x_n^2y_n + a_8x_ny_n^2 + a_9y_n^3. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \eta_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3x_1^2 + b_4x_1y_1 + b_5y_1^2 + b_6x_1^3 + b_7x_1^2y_1 + b_8x_1y_1^2 + b_9y_1^3; \\ \vdots \\ \eta_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_i^2 + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^3 + b_7x_i^2y_i + b_8x_iy_i^2 + b_9y_i^3; \\ \vdots \\ \eta_n = b_0 + b_1x_n + b_2y_n + b_3x_n^2 + b_4x_ny_n + b_5y_n^2 + b_6x_n^3 + b_7x_n^2y_n + b_8x_ny_n^2 + b_9y_n^3. \end{cases} \quad (14)$$

МНК-оценкой коэффициентов модели постоянных пластинок является вектор [21]:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} (\tilde{Y} - J_1\theta)^T (\tilde{Y} - J_1\theta), \quad (15)$$

где  $\hat{\theta}$  – оценка вектора коэффициентов постоянных пластинок  $\theta$  (4);

$\tilde{Y} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{N_{ref}})$ ,  $\tilde{Y} = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{N_{ref}})$  – совокупности соответствующих идеальных координат опорных звезд, рассчитанных по формулам (13), (14);

$N_{ref}$  – количество опорных звезд;

$J_1$  – матрица Якоби, общая для уравнений (13) и (14).

В общем случае матрица Якоби имеет вид:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_p} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица Якоби (16)  $J$  составляется из частных производных оценки идеальных координат (11), (12) по вектору коэффициентов постоянных пластинок (4). При этом  $i$ -й строке матрицы Якоби  $J$  соответствует

значение производных по всем оцениваемым параметрам по отклонению в  $i$ -ом измерении, а  $n$ -й столбец матрицы содержит производные по  $n$ -му параметру вектора оцениваемых параметров  $\theta$  в каждом измерении. Другими словами,  $i$ -й элемент матрицы Якоби представляет собой производную оценки идеальной координаты в  $i$ -ом измерении по  $n$ -му параметру вектора оцениваемых параметров  $\theta$  (4).

Матрица Якоби для квадратичной модели может быть представлена выражением:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \xi_{N_{ref}}}{\partial \theta_p} \end{bmatrix} \cdot \quad (17)$$

В свою очередь, матрица Якоби для кубической модели имеет вид:

$$J_1^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & \dots & x_i & \dots & x_{N_{ref}} \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N_{ref}} \\ x_1^2 & \dots & x_i^2 & \dots & x_{N_{ref}}^2 \\ x_1 y_1 & \dots & x_i y_i & \dots & x_{N_{ref}} y_{N_{ref}} \\ y_1^2 & \dots & y_i^2 & \dots & y_{N_{ref}}^2 \\ x_1^3 & \dots & x_i^3 & \dots & x_{N_{ref}}^3 \\ x_1^2 y_1 & \dots & x_i^2 y_i & \dots & x_{N_{ref}}^2 y_{N_{ref}} \\ x_1 y_1^2 & \dots & x_i y_i^2 & \dots & x_{N_{ref}} y_{N_{ref}}^2 \\ y_1^3 & \dots & y_i^3 & \dots & y_{N_{ref}}^3 \end{bmatrix} \cdot \quad (18)$$

В случае использования модели с полиномом пятой степени:

$$J_1^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & \dots & x_i & \dots & x_{N_{ref}} \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N_{ref}} \\ x_1^2 & \dots & x_i^2 & \dots & x_{N_{ref}}^2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^5 & \dots & x_i^5 & \dots & x_{N_{ref}}^5 \\ x_1^4 y_1 & \dots & x_i^4 y_i & \dots & x_{N_{ref}}^4 y_{N_{ref}} \\ x_1^3 y_1^2 & \dots & x_i^3 y_i^2 & \dots & x_{N_{ref}}^3 y_{N_{ref}}^2 \\ x_1^2 y_1^3 & \dots & x_i^2 y_i^3 & \dots & x_{N_{ref}}^2 y_{N_{ref}}^3 \\ x_1 y_1^4 & \dots & x_i y_i^4 & \dots & x_{N_{ref}} y_{N_{ref}}^4 \\ y_1^5 & \dots & y_i^5 & \dots & y_{N_{ref}}^5 \end{bmatrix} \cdot \quad (19)$$

Задача вычисления МНК-оценки сводится к

решению системы линейных алгебраических уравнений [18]:

$$J^T J \hat{\theta} = J^T \tilde{Y}, \quad (20)$$

Количество неизвестных в системе уравнений (13), (14) не меньше, чем число уравнений, поэтому эта система имеет по крайней мере одно решение [18].

Если матрица  $J^T J$  невырождена, то система уравнений имеет единственное решение [18]:

$$\hat{\theta} = (J^T J)^{-1} J^T \tilde{Y}. \quad (21)$$

В случае вырожденности матрицы  $J^T J$  решение (21) неприменимо, так как обращение плохо обусловленной матрицы приводит к накоплению вычислительных ошибок [24]. Один из способов решения этой проблемы — QR-разложение [25] матрицы  $J^T J$  из (20) с помощью модифицированного алгоритма Грама-Шмидта [25].

Так же МНК оценка может быть найдена с использованием градиентных методов, методов последовательного приближения, или их модификаций, например, алгоритма Левенберга-Марквардта (АЛМ) [25], являющегося комбинацией методов Ньютона и градиентного спуска.

В рамках проведенных исследований использовалась программная реализация алгоритма Левенберга-Марквардта из математического пакета ALGLIB [26]. Выбор библиотеки основан на её кроссплатформенности (поддерживает Windows, Linux, Solaris), совместимости с широким спектром компиляторов (C++, C#, FreePascal, Delphi), простоте использования и широком наборе математических функций.

Процесс расчета коэффициентов постоянных пластинок выполняется итерационно, с уточнением на каждой  $k$ -ой итерации экваториальных координат центра цифрового кадра ( $\alpha_{0k}, \delta_{0k}$ ) по коэффициентам постоянных пластинок, поученным на предыдущей итерации.

На первом шаге, для каждой опорной звезды, по формуле (1) рассчитываются её идеальные координаты ( $\xi_i, \eta_i$ ). По полученным координатам составляются системы уравнений (13) и (14), по всем опорным звездам формируется матрица Якоби (18). С использованием АЛМ, по составленным системам уравнений и матрице Якоби, определяются вектора коэффициентов постоянных пластинок  $\theta_k$ .

По полученным постоянным пластинки и заданным в СК цифрового кадра координатам оптического центра кадра ( $x_0, y_0$ ), с использованием формулы кубической модели (9), (10), рассчитывается новый центр кадра в идеальной системе координат ( $\xi_{0k}, \eta_{0k}$ ). По формулам (2) определяются его координаты в экваториальной СК ( $\alpha_{0k}, \delta_{0k}$ ).

Итерационный процесс заканчивается при достижении заданного максимального количества

итераций  $N_{iter}$  (на практике максимальное количество итераций выбирают в диапазоне  $N_{iter} = [5...10]$ ), или при выполнении условия:

$$\begin{cases} (\alpha_{0k+1} - \alpha_{0k}) \cdot 3600 < \varepsilon; \\ (\delta_{0k+1} - \delta_{0k}) \cdot 3600 < \varepsilon, \end{cases} \quad (22)$$

где  $\varepsilon$  – минимально допустимое изменение расчетных значений оптических центров кадров на соседних итерациях для прекращения итерационного процесса, в угловых секундах.

В рамках данной работы предельно допустимое значение параметра задавалось как  $\varepsilon = 0.0005$ , но в процессе исследований значение не превышало  $4 \cdot 10^{-6}$ .

По окончании итерационного процесса, полученные оценки коэффициентов постоянных пластинок  $\hat{\theta}$  и значения уточненного оптического центра кадра  $(\xi_{0_k}, \eta_{0_k})$  можно использовать для определения экваториальных координат объекта по его известным координатам в системе цифрового кадра.

#### Прямая модель редукции. Обратная модель преобразования.

В процессе выбора опорных звезд возникает необходимость в определении координат объекта в СК цифрового кадра по его известным экваториальным координатам и постоянным пластинкам. Решение этой задачи в рамках прямой модели редукции проходит в два этапа.

На первом этапе, согласно формуле (1), экваториальные координаты объекта преобразуются в координаты в идеальной системе координат  $(\xi_i, \eta_i)$ . По полученным значениям  $(\xi_i, \eta_i)$  и оценке вектора постоянных пластинок  $\hat{\theta}$ , составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \xi_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2 + a_6 x_i^3 + \\ + a_7 x_i^2 y_i + a_8 x_i y_i^2 + a_9 y_i^3; \\ \eta_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 x_i y_i + b_5 y_i^2 + b_6 x_i^3 + \\ + b_7 x_i^2 y_i + b_8 x_i y_i^2 + b_9 y_i^3, \end{cases} \quad (23)$$

Матрица Якоби, составленная из частных производных по искомым параметрам, представляется в форме:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} & \frac{\partial \xi_i}{\partial y_i} \\ \frac{\partial \eta_i}{\partial x_i} & \frac{\partial \eta_i}{\partial y_i} \end{vmatrix}. \quad (24)$$

и блеска небесного объекта

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} = a_1 + 2a_3 x_i + a_4 y_i + 3a_6 x_i^2 + 2a_7 x_i y_i + a_8 y_i^2; \quad (25)$$

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial y_i} = a_2 + a_4 x_i + 2a_5 y_i + a_8 x_i^2 + 2a_7 x_i y_i + 3a_9 y_i^2. \quad (26)$$

Производные  $\frac{\partial \eta_i}{\partial x_i}$ ,  $\frac{\partial \eta_i}{\partial y_i}$  получаются по аналогии с выражениями (25) и (26).

С целью повышения скорости сходимости АЛМ, в качестве начальных приближений используются значение координат  $(x_{istart}, y_{istart})$ , полученные из линейной модели постоянных пластинок (3):

$$x_{istart} = \frac{(\xi_i - a_2) \cdot b_1 - (\eta_i - b_2) \cdot a_1}{a_0 b_1 - a_1 b_0}; \quad (27)$$

$$y_{jstart} = \frac{(\eta_i - b_2) \cdot a_0 - (\xi_i - a_2) \cdot b_0}{a_0 b_1 - a_1 b_0}. \quad (28)$$

С использованием модифицированного алгоритма Левенберга-Марквардта, по составленной системе уравнений (23) и матрице Якоби (24) определяются искомые координаты  $i$ -го объекта в СК цифрового кадра  $(x_i, y_i)$ .

#### Обратная модель редукции.

В редукционных уравнениях (15) минимизируется сумма квадратов относительно идеальных координат, то есть предполагается, что основной вклад в ошибку редукции происходит от экваториальных координат в каталоге. Это утверждение верно только для длиннофокусных телескопов – в них из-за малого масштаба поля зрения можно пренебречь погрешностью в измеренных координатах. В диаметрально противоположном случае, когда погрешность измерения существенно больше погрешности каталога, целесообразно применение модели редукции, обратной представленной в (3):

$$\begin{cases} x_i = a_0 + a_1 \xi_i + a_2 \eta_i; \\ y_i = a_0 + a_1 \xi_i + a_2 \eta_i. \end{cases} \quad (29)$$

Коэффициенты системы уравнений (29) задают зависимость между СК цифрового кадра и идеальной СК. Известными величинами в системе уравнений (29) являются прямоугольные  $(x_i, y_i)$  и идеальные  $(\xi_i, \eta_i)$  координаты  $i$ -й опорной звезды.

Квадратичная модель зависимости координат СК цифрового кадра и идеальной СК принимает следующий вид:

$$x_i = a_0 + a_1 \xi_i + a_2 \eta_i + a_3 \xi_i^2 + a_4 \xi_i \eta_i + a_5 \eta_i^2; \quad (30)$$

$$y_i = b_0 + b_1 \xi_i + b_2 \eta_i + b_3 \xi_i^2 + b_4 \xi_i \eta_i + b_5 \eta_i^2. \quad (31)$$

Кубическая модель постоянных пластинок представляется выражениями:

$$\begin{aligned} x_i = a_0 + a_1 \xi_i + a_2 \eta_i + a_3 \xi_i^2 + a_4 \xi_i \eta_i + a_5 \eta_i^2 + \\ + a_6 \xi_i^3 + a_7 \xi_i^2 \eta_i + a_8 \xi_i \eta_i^2 + a_9 \eta_i^3 \end{aligned} \quad (32)$$

$$y_i = b_0 + b_1\xi_i + b_2\eta_i + b_3\xi_i^2 + b_4\xi_i\eta_i + b_5\eta_i^2 + b_6\xi_i^3 + b_7\xi_i^2\eta_i + b_8\xi_i\eta_i^2 + b_9\eta_i^3 \quad (33)$$

а для модели с полиномом пятой степени, зависимость (29) описывается таким образом:

$$x_i = a_0 + a_1\xi_i + a_2\eta_i + a_3\xi_i^2 + a_4\xi_i\eta_i + a_5\eta_i^2 + a_6\xi_i^3 + a_7\xi_i^2\eta_i + a_8\xi_i\eta_i^2 + a_9\eta_i^3 + a_{10}\xi_i^4 + a_{11}\xi_i^3\eta_i + a_{12}\xi_i^2\eta_i^2 + a_{13}\xi_i\eta_i^3 + a_{14}\eta_i^4 + a_{15}\xi_i^5 + a_{16}\xi_i^4\eta_i + a_{17}x_i^3y_i^2 + a_{18}x_i^2y_i^3 + a_{19}x_iy_i^4 + a_{20}y_i^5; \quad (34)$$

$$y_i = b_0 + b_1\xi_i + b_2\eta_i + b_3\xi_i^2 + b_4\xi_i\eta_i + b_5\eta_i^2 + b_6\xi_i^3 + b_7\xi_i^2\eta_i + b_8\xi_i\eta_i^2 + b_9\eta_i^3 + b_{10}\xi_i^4 + b_{11}\xi_i^3\eta_i + b_{12}\xi_i^2\eta_i^2 + b_{13}\xi_i\eta_i^3 + b_{14}\eta_i^4 + b_{15}\xi_i^5 + b_{16}\xi_i^4\eta_i + b_{17}\xi_i^3\eta_i^2 + b_{18}\xi_i^2\eta_i^3 + b_{19}\xi_i\eta_i^4 + b_{20}\eta_i^5. \quad (35)$$

Как и в прямой модели редукции, для определения коэффициентов постоянных пластинок выбирают избыточную совокупность опорных звезд, для каждой звезды записывают пару уравнений, а затем решают полученную избыточную МНК-систему уравнений [23]:

$$\begin{cases} x_1 = a_0 + a_1\xi_1 + a_2\eta_1 + a_3\xi_1^2 + a_4\xi_1\eta_1 + a_5\eta_1^2 + a_6\xi_1^3 + a_7\xi_1^2\eta_1 + a_8\xi_1\eta_1^2 + a_9\eta_1^3; \\ \vdots \\ x_i = a_0 + a_1\xi_i + a_2\eta_i + a_3\xi_i^2 + a_4\xi_i\eta_i + a_5\eta_i^2 + a_6\xi_i^3 + a_7\xi_i^2\eta_i + a_8\xi_i\eta_i^2 + a_9\eta_i^3; \\ \vdots \\ x_n = a_0 + a_1\xi_n + a_2\eta_n + a_3\xi_n^2 + a_4\xi_n\eta_n + a_5\eta_n^2 + a_6\xi_n^3 + a_7\xi_n^2\eta_n + a_8\xi_n\eta_n^2 + a_9\eta_n^3; \\ y_1 = b_0 + b_1\xi_1 + b_2\eta_1 + b_3\xi_1^2 + b_4\xi_1\eta_1 + b_5\eta_1^2 + b_6\xi_1^3 + b_7\xi_1^2\eta_1 + b_8\xi_1\eta_1^2 + b_9\eta_1^3; \\ \vdots \\ y_i = b_0 + b_1\xi_i + b_2\eta_i + b_3\xi_i^2 + b_4\xi_i\eta_i + b_5\eta_i^2 + b_6\xi_i^3 + b_7\xi_i^2\eta_i + b_8\xi_i\eta_i^2 + b_9\eta_i^3; \\ \vdots \\ y_n = b_0 + b_1\xi_n + b_2\eta_n + b_3\xi_n^2 + b_4\xi_n\eta_n + b_5\eta_n^2 + b_6\xi_n^3 + b_7\xi_n^2\eta_n + b_8\xi_n\eta_n^2 + b_9\eta_n^3. \end{cases} \quad (36)$$

МНК-оценкой коэффициентов модели постоянных пластинок является вектор [18]:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} (\tilde{Y} - J_2\theta)^T (\tilde{Y} - J_2\theta), \quad (38)$$

где  $\hat{\theta}$  – оценка вектора коэффициентов постоянных пластинок  $\theta$  (4);

$\tilde{Y} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_{ref}})$ ,  $\tilde{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_{N_{ref}})$  – совокупности соответствующих прямоугольных координат опорных звезд, определенных по формулам (13), (14);  $N_{ref}$  – количество опорных звезд;

$J_2$  – матрица Якоби, общая для уравнений (36) и (37). Матрица Якоби в общем виде для данного случая представляется как:

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_i}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_{N_{ref}}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x_{N_{ref}}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial x_{N_{ref}}}{\partial \theta_p} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Матрица Якоби для квадратичной модели описывается выражением:

$$J_2^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \xi_1 & \dots & \xi_i & \dots & \xi_{N_{ref}} \\ \eta_1 & \dots & \eta_i & \dots & \eta_{N_{ref}} \\ \xi_1^2 & \dots & \xi_i^2 & \dots & \xi_{N_{ref}}^2 \\ \xi_1\eta_1 & \dots & \xi_i\eta_i & \dots & \xi_{N_{ref}}\eta_{N_{ref}} \\ \eta_1^2 & \dots & \eta_i^2 & \dots & \eta_{N_{ref}}^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Для кубической модели матрица Якоби принимает вид:

$$J_2^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \xi_1 & \dots & \xi_i & \dots & \xi_{N_{ref}} \\ \eta_1 & \dots & \eta_i & \dots & \eta_{N_{ref}} \\ \xi_1^2 & \dots & \xi_i^2 & \dots & \xi_{N_{ref}}^2 \\ \xi_1\eta_1 & \dots & \xi_i\eta_i & \dots & \xi_{N_{ref}}\eta_{N_{ref}} \\ \eta_1^2 & \dots & \eta_i^2 & \dots & \eta_{N_{ref}}^2 \\ \xi_1^3 & \dots & \xi_i^3 & \dots & \xi_{N_{ref}}^3 \\ \xi_1^2\eta_1 & \dots & \xi_i^2\eta_i & \dots & \xi_{N_{ref}}^2\eta_{N_{ref}} \\ \xi_1\eta_1^2 & \dots & \xi_i\eta_i^2 & \dots & \xi_{N_{ref}}\eta_{N_{ref}}^2 \\ \eta_1^3 & \dots & \eta_i^3 & \dots & \eta_{N_{ref}}^3 \end{bmatrix} \quad (41)$$

В случае использования модели с полиномом пятой степени:

$$J_2^T = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \xi_1 & \dots & \xi_i & \dots & \xi_{N_{ref}} \\ \eta_1 & \dots & \eta_i & \dots & \eta_{N_{ref}} \\ \xi_1^2 & \dots & \xi_i^2 & \dots & \xi_{N_{ref}}^2 \\ \xi_1\eta_1 & \dots & \xi_i\eta_i & \dots & \xi_{N_{ref}}\eta_{N_{ref}} \\ \eta_1^2 & \dots & \eta_i^2 & \dots & \eta_{N_{ref}}^2 \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \xi_1^5 & \dots & \xi_i^5 & \dots & \xi_{N_{ref}}^5 \\ \xi_1^4\eta_1 & \dots & \xi_i^4\eta_i & \dots & \xi_{N_{ref}}^4\eta_{N_{ref}} \\ \xi_1^3\eta_1^2 & \dots & \xi_i^3\eta_i^2 & \dots & \xi_{N_{ref}}^3\eta_{N_{ref}}^2 \\ \xi_1^2\eta_1^3 & \dots & \xi_i^2\eta_i^3 & \dots & \xi_{N_{ref}}^2\eta_{N_{ref}}^3 \\ \xi_1\eta_1^4 & \dots & \xi_i\eta_i^4 & \dots & \xi_{N_{ref}}\eta_{N_{ref}}^4 \\ \eta_1^5 & \dots & \eta_i^5 & \dots & \eta_{N_{ref}}^5 \end{bmatrix} \quad (42)$$



Задача вычисления МНК-оценки сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, представленной в (20)

Процесс расчета коэффициентов постоянных пластинок в целом аналогичен рассмотренному для прямой модели редукции. После формирования постоянных пластинок и используя заданные координаты оптического центра кадра  $(x_0, y_0)$ , составляется система уравнений:

$$\begin{cases} x_i = a_0 + a_1\xi_i + a_2\eta_i + a_3\xi_i^2 + a_4\xi_i\eta_i + a_5\eta_i^2 + a_6\xi_i^3 + \\ + a_7\xi_i^2\eta_i + a_8\xi_i\eta_i^2 + a_9\eta_i^3; \\ y_i = b_0 + b_1\xi_i + b_2\eta_i + b_3\xi_i^2 + b_4\xi_i\eta_i + b_5\eta_i^2 + b_6\xi_i^3 + \\ + b_7\xi_i^2\eta_i + b_8\xi_i\eta_i^2 + b_9\eta_i^3, \end{cases} \quad (43)$$

для которой матрица Якоби имеет вид:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} & \frac{\partial y_i}{\partial \eta_i} \\ \frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} & \frac{\partial y_i}{\partial \eta_i} \\ \frac{\partial \xi_i}{\partial \xi_i} & \frac{\partial \eta_i}{\partial \eta_i} \end{pmatrix}, \quad (44)$$

где частные производные:

$$\frac{\partial x_i}{\partial \xi_i} = a_1 + 2a_3\xi_i + a_4\eta_i + 3a_6\xi_i^2 + 2a_7\xi_i\eta_i + a_8\eta_i^2, \quad (45)$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial \eta_i} = a_2 + a_4\xi_i + 2a_5\eta_i + a_8\xi_i^2 + 2a_7\eta_i + 3a_9\eta_i^2. \quad (46)$$

Полученные в результате решения системы (43) координаты оптического центра цифрового кадра в идеальной СК  $(\xi_{0k}, \eta_{0k})$ , с использованием формул сферической тригонометрии (2), преобразуются в экваториальные координаты  $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$ . При выполнении условия (22) итерационный процесс заканчивается, а координаты  $(\alpha_{0k}, \delta_{0k})$  принимаются как уточненные экваториальные координаты оптического центра кадра  $(\alpha_0, \delta_0)$ .

Полученные оценки коэффициентов постоянных пластинок  $\hat{\theta}$  (38) и значения уточненных экваториальных координат оптического центра кадра  $(\xi_{0k}, \eta_{0k})$  можно использовать для определения координат объекта в системе цифрового кадра по его известным экваториальным координатам.

#### Анализ разработанных методов

Исследования проводились на двух независимых сериях цифровых кадров - полученных с использованием длиннофокусных и короткофокусных оптических систем. В качестве короткофокусного телескопа использовался телескоп Genop обсерватории ISON-Кисловодск (код MPC D00) с фокусным расстоянием  $f = 294.76$  мм. Для исследований на длиннофокусной оптической системе использовался VacuumNewton-Telescope

(VNT) обсерватории «Vihorlat Observatory in Humenné» с длиной фокуса  $f = 8922.71$ . Так же в исследовании использовался телескоп САНТЕЛ-400АН обсерватории ISON-NM (код MPC H15), имеющий промежуточное значение фокусного расстояния между двумя предыдущими -  $f = 1197.37$ .

Исследовались показатели точности определения экваториальных координат как опорных звезд так и все звезд кадра, отождествленных с каталогом UCAC4 [9].

В качестве показателей точности использовались:

- оценка среднего отклонения оценок экваториальных координат объектов  $\hat{\Delta}_{\alpha_{ij(k)}}, \hat{\Delta}_{\delta_{ij(k)}}$ :

$$\hat{\Delta}_{\alpha_{ij(k)}} = \sum_{i=1}^{N_{obj}} \Delta_{\alpha_{i(k)}} / N_{obj}; \quad (47)$$

$$\hat{\Delta}_{\delta_{ij(k)}} = \sum_{j=1}^{N_{obj}} \Delta_{\delta_{i(k)}} / N_{obj}, \quad (48)$$

где  $\Delta_{\alpha_{ij(k)}}, \Delta_{\delta_{ij(k)}}$  - отклонения между оценками  $(\alpha_{i(k)}, \delta_{i(k)})$  экваториальных координат  $i$ -го измерения кадра и  $j$ -го формуляра каталога  $(\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)})$ , составляющих  $k$ -ю отождествленную пару  $(\alpha_{ij(k)}, \delta_{ij(k)})$ ;

$N_{obj}$  - количество отождествленных пар «измерение-формуляр»;

- оценка среднего полного отклонения оценок экваториальных координат объектов и их формулярными значениями  $\hat{\Delta}_{\alpha\delta_{ij(k)}}$ :

$$\hat{\Delta}_{\alpha\delta_{ij(k)}} = \sum_{i=1}^{N_{obj}} \Delta_{\alpha\delta_{i(k)}} / N_{obj}, \quad (49)$$

где  $\Delta_{\alpha\delta_{ij(k)}}$  - полное отклонение между оценками  $(\alpha_{i(k)}, \delta_{i(k)})$  экваториальных координат  $i$ -го объекта и его формулярным значением  $(\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)})$ :

$$\Delta_{\alpha\delta_{ij(k)}} = \arccos(\sin\alpha_{i(k)} \cdot \sin\alpha_{j(k)} + \cos\alpha_{i(k)} \cdot \cos\alpha_{j(k)} \cdot \cos\Delta_{\delta_{ij(k)}}); \quad (50)$$

- оценка среднеквадратичного отклонения оценок прямого восхождения и склонения  $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\delta}$ :

$$\sigma_{\alpha_{ij(k)}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{obj}} (\Delta_{\alpha_{ij(k)}} - \hat{\Delta}_{\alpha_{ij(k)}})^2 / N_{obj}}; \quad (51)$$

$$\sigma_{\delta_{ij(k)}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{obj}} (\Delta_{\delta_{ij(k)}} - \hat{\Delta}_{\delta_{ij(k)}})^2 / N_{obj}}; \quad (52)$$

- квантили [29] модулей отклонений по прямому восхождению и склонению на уровне 0.9 и 0.99.

Исследования проводились с использованием ПО CoLiTec [3, 27, 28], обрабатывались ПО SSOAnSe [29] а их результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты анализа методов прямой и обратной координатной редукции.

| Параметр сравнения                                      | Длиннофокусный телескоп (VNT)<br>$f = 8922.71$ мм |                   | Среднефокусный телескоп (САНТЕЛ-400АН)<br>$f = 1197.37$ мм. |                   | Короткофокусный телескоп (Genop)<br>$f = 294.76$ мм. |                   |
|---|---|-------------------|---|-------------------|--|-------------------|
|   | Прямая редукция                                   | Обратная редукция | Прямая редукция   | Обратная редукция | Прямая редукция                                      | Обратная редукция |
| Опорные звезды  |   |                   |   |                   |  |                   |
| Выбрано опорных звезд                                   | 6510  | 6701              | 36046   | 36048             | 1497   | 1497              |
| $\hat{\Delta}_{\alpha\delta} < 0.25$ угл. сек           | 6506  | 6698              | 36044   | 36046             | 431  | 432               |
| $\sigma_{\alpha}$ , угл. сек.                           | 0.03  | 0.03              | 0.06  | 0.06              | 0.25   | 0.25              |
| $\sigma_{\delta}$ , угл. сек.                           | 0.03  | 0.03              | 0.05  | 0.05              | 0.26   | 0.26              |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек   | 0.051   | 0.051             | 0.1   | 0.101             | 0.400  | 0.400             |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек.  | 0.054   | 0.055             | 0.087   | 0.087             | 0.408  | 0.408             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек. | 0.06  | 0.082             | 0.132   | 0.132             | 0.522  | 0.522             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек  | 0.065   | 0.082             | 0.120   | 0.120             | 0.529  | 0.529             |
| Звезды UCAC4  |   |                   |   |                   |  |                   |
| Всего звезд UCAC4 на кадрах                             | 16018   | 16037             | 90538   | 90538             | 8019   | 8019              |
| $\hat{\Delta}_{\alpha}$ , угл. сек.                     | 0.00  | 0.00              | 0.02  | 0.02              | -0.06  | -0.06             |
| $\hat{\Delta}_{\delta}$ , угл. сек.                     | 0.00  | 0.00              | -0.01   | -0.01             | 0.2  | 0.2               |
| $\sigma_{\alpha}$ , угл. сек.                           | 0.18  | 0.18              | 0.2   | 0.2               | 0.57   | 0.57              |
| $\sigma_{\delta}$ , угл. сек.                           | 0.16  | 0.16              | 0.18  | 0.18              | 0.62   | 0.61              |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек.  | 0.360   | 0.356             | 0.295   | 0.295             | 0.853  | 0.85              |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек.  | 0.252   | 0.248             | 0.22  | 0.22              | 0.918  | 0.918             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек. | 0.684   | 0.673             | 0.587   | 0.587             | 1.487  | 1.483             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек. | 0.521   | 0.509             | 0.523   | 0.523             | 1.875  | 1.87              |
| Звезды BK   |   |                   |   |                   |  |                   |
| Всего звезд BK на кадрах                                | 60073   | 60076             | 939253  | 939250            | 123377   | 123375            |
| $\hat{\Delta}_{\alpha\delta} < 0.25$ угл. сек           | 47279   | 47280             | 592891  | 592877            | 78996  | 78999             |
| $\sigma_{\alpha}$ , угл. сек.                           | 0.33  | 0.33              | 0.75  | 0.75              | -0.01  | -0.01             |
| $\sigma_{\delta}$ , угл. сек.                           | 0.31  | 0.3               | 0.67  | 0.67              | -0.01  | -0.01             |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек   | 0.713   | 0.716             | 1.314   | 1.314             | 2.182  | 2.178             |
| Квантиль 0.9 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек.  | 0.497   | 0.496             | 1.16  | 1.16              | 2.206  | 2.206             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\alpha$ , угл. сек. | 1.231   | 1.238             | 1.994   | 1.994             | 4.403  | 4.406             |
| Квантиль 0.99 модуля отклонений по $\delta$ , угл. сек  | 0.931   | 0.927             | 1.877   | 1.877             | 4.442  | 4.442             |

### Выводы

В статье разработаны вычислительные методы определения экваториальных координат небесных объектов по оценке их положения на цифровом кадре. Данные методы основаны на возможности представления ошибок в отображении положения небесных объектов на цифровом кадре в виде редукционного уравнения, зависящего только от расположения объекта на кадре. Рассмотренные методы учитывают особенности короткофокусных и длиннофокусных оптических систем. Для оценки коэффициентов редукционного уравнения использован модифицированный алгоритм Левенберга-Марквардта и его реализация из математического пакета ALGLIB.

Анализ результатов применения разработанных вычислительных методов оценок экваториальных координат небесных объектов проведен на кадрах, полученных с использованием длиннофокусной и короткофокусной оптической системы. В качестве исследуемых объектов были выбраны опорные звезды, а так же звезды, отождествленные с UCAC4.

Результаты проведенного анализа показали, что использование обратной модели редукции дает преимущества в короткофокусных оптических системах. Так, использование обратной модели редукции повысило число опорных звезд с 6510 до 6701. В тоже время, в классе звезд, отождествленных со звездным каталогом UCAC4, снизились квантили модулей отклонений по экваториальным координатам на уровне 0.99. Для длиннофокусных телескопов

предпочтительней оказалось применение прямой редуцированной модели.

Для дальнейшего повышения точности в обоих видах оптических систем целесообразно сконцентрировать исследования на методах внешней координатной редукиции.

#### Список литературы

1. **George, E. S.** Nobel Lecture: The invention and early history of the CCD / **E. Smith George** // *Reviews of modern physics* – 2010. – 82 (3) – P. 2307–2312.
2. **Andersen, G.** The Telescope: Its History, Technology, and Future / **G. Andersen** // *Princeton University Press* - 2007. – 256 p.
3. **Savanevych, V. E.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / **V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, N. S. Sokovikova, M. M. Bezkrivnyy, I. B. Vavilova, Yu. M. Ivashchenko, L. V. Elenin, S. V. Khlamov, Ia. S. Movsesian, A. M. Dashkova, A. V. Pogorelov** // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – Т. 451 (3). – P. 3287–3298. – doi: 10.1093/mnras/stv1124.
4. **Дума, Д. П.** Загальна астрометрія. Навчальний посібник / **Д. П. Дума** – Київ: Наукова думка – 2007. – 600 с.
5. **Соковикова, Н. С.** Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении / **Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, С. В. Хламов** // *Восточно-Европейского журнала передовых технологий*. – 2013. – Т. 4/4(64). – С. 41 – 45.
6. **Безкровный, М. М.** Исследование точности оценки местоположения небесных объектов на ПЗС-кадрах / **М. М. Безкровный, В. Е. Саваневич, Н. С. Соковикова, Я. С. Мовсеян, А. В. Погорелов, А. Н. Дашкова, Н. Ю. Дихтярь, А. Б. Брюховецкий, Л. О. Михайлова** // *Восточно-Европейского журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 4/2(70). – С. 16 – 22.
7. **Саваневич, В. Е.** Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на CCD-кадре / **В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков** // *Система обробки інформації*. – 2010. – Вип. 6(87). – С. 172 – 179.
8. **Zacharias, N.** Catalog Information and Recommendations, U.S. Naval Observatory / **N. Zacharias, R. Gaume, B. Dorland, S. E. Urban**. [Эл. ресурс]. – Режим доступа: [http://ad.usno.navy.mil/star/star\\_cats\\_rec.shtml](http://ad.usno.navy.mil/star/star_cats_rec.shtml)
9. **Zacharias, N.** The fourth US naval observatory CCD astrophotograph catalog (UCAC4) / **N. Zacharias** // *The Astronomical Journal*. – 2013. – Vol. 145(2). – 44 p. – doi: 10.1088/0004-6256/145/2/44.
10. **Саваневич, В. Е.** Метод формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на серии кадров / **В. Е. Саваневич, Я. С. Мовсеян, Н. Ю. Дихтярь** // *Система обробки інформації* – 2016. – № 8(145). – С. 44-49.
11. **Robin, M. G.** Spherical Astronomy / **M. G. Andersen** // *Cambridge University Press* - 1985. – 520 p.
12. **Garrett, J.** Modelling Image Distortions from Atmospheric Turbulence in Wide-Field Astronomical Imaging Systems / **Garrett, John, Steve, En-Hsin, Mallory, Chihway** // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* – 2011. – 1(9) – P. 1-10.
13. **Martin, R.** Processing of the Astronomical Image Data obtained from UWFC Optical Systems / **R Martin, P. Petr, K. Pavel** // *SPIE Digital Library* – 2008. – Vol. 7076. – P. 1-11. – doi: 10.1117/12.794858.
14. **Максутов, Д. Д.** Астрономическая оптика / **Д. Д. Максудов** – М.: Наука, - 1984. – 272 с.
15. **McLean, I. S.** Electronic Imaging in Astronomy. Detectors and Instrumentation (Second Edition) / **McLean I. S.** – Berlin: Springer-Praxis. – 2008. – 592 p.
16. **Calabretta, M. R.** Representations of celestial coordinates in FITS / **M. R. Calabretta, E. W. Greisen** // *Astronomy & Astrophysics*. – 2002. – Vol. 395. – P. 1077–1122. – doi: 10.1051/0004-6361:20021327.
17. **Киселев, А. А.** Теоретические основания фотографической астрометрии / **А. А. Киселев** – М.: Наука - 1989. – 264 с.
18. **Ермаков, С. М.** Математическая теория оптимального эксперимента / **С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский**. – М.: Наука. – 1987 – 320 с.
19. **Hogg, D. W.** Automated Astrometry / **D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang** // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, R. W. Argyle, P. S. Bunclark, and J. R. Lewis, eds., ASP Conference Series. – 2008. – Vol. 394. – P. 27–34.
20. **Sasian, M. J.** Introduction to aberrations in optical imaging systems / **Sasian M. J.** – Cambridge University Press - 2013. – 261 p.
21. **Hazewinkel, M.** Encyclopaedia of Mathematics / **M. Hazewinkel** // *Springer Netherlands*. – 2001. – 732 p.
22. **Günter, D. R.** Compendium of Practical Astronomy: Volume 1: Instrumentation and Reduction Techniques / **Günter D. R.** – *Springer Science & Business Media*. - 2012. – 540 p.
23. **Björck, A.** Numerical Methods for Least Squares Problems / **A. Björck** – *Society for Industrial and Applied Mathematics* – 1996. – 408 p.
24. **Predrag, S.** Computing generalized inverse of polynomial matrices by interpolation / **S. Predrag, P. Marko** // *Applied mathematics and computation* – 2006. – 508 p.
25. **Dax, A.** A modified Gram–Schmidt algorithm with iterative orthogonalization and column pivoting / **A. Dax** // *Linear Algebra and its Applications*. – 2000. – Vol. 310. – P. 25-42. – doi: 10.1016/S0024-3795(00)00022-7.
26. **ALGLib** [Электронный ресурс] – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.alglib.net/> 16.10.2015г.
27. **Саваневич, В. Е.** Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском / **В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко** // *Космічна наука і технологія*. – 2012. – т.18. №1. – С. 39 – 46.
28. **Savanevych, V. E.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / **V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezkrivnyy, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov** // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302-313. – doi: 10.3103/S0884591315060045.
29. **Безкровный, М. М.** Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы / **М. М. Безкровный, А. Н. Дашкова, Н. С. Соковикова,**

**В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий** // *Восточно-Европейского журнал передовых технологий*. – 2015. – Т. 2/2(22). – С. 26 – 37. – doi: 10.15587/2312-8372.2015.40820.

#### Bibliography (transliterated)

1. **George E. S.** Nobel Lecture: The invention and early history of the CCD. *Reviews of modern physics*, 2010, **82** (3), 2307-2312.
2. **Andersen, G.** The Telescope: Its History, Technology, and Future. Princeton University Press, 2007, 256 p.
3. **Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Sokovikova N. S., Bezkrorny M. M., Vavilova I. B., Ivashchenko, Yu. M., Elenin L. V., Khlamov S. V., Movsesian Ia. S., Dashkova Ia. S., Pohorelov A. V.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinate. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **451**(3), 3287-3298, doi: 10.1093/mnras/stv1124.
4. **Duma D. P.** Zahal'na astrometriya [General astrometry]. *Navchal'nyy posibnyk. Kyiv: Naukova dumka*, 2007, 600 p.
5. **Sokovikova, N. S., Savanevych, V. E., Bezkrorny, M. M., Khlamov, S. V.** Ocenka koordinat blizkih asteroidov na PZS-izobrazhenii [Evaluation coordinates close to asteroids CCD image]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, **4/4**(64), 41-45.
6. **Bezkrorny, M. M., Savanevych, V. E., Sokovikova, N. S., Movsesian, Ia. S., Pohorelov, A. V., Dashkova, A. N., Dikhtyar, N. Yu., Briukhovetskyi, A. B., Mihajlova, L. O.** Issledovanie tochnosti ocenki mestopolozhenija nebesnyh ob'ektov na PZS-kadrah [A study evaluating the accuracy of the location of celestial objects on the CCD frames]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, **4/2**(70), 16-22.
7. **Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, A. B., Kozhuhov, A. M., Dikov, E. N.** Ocenka jekvatorial'nyh koordinat asteroida po ocenkam ego koordinat na CCD-kadre [Evaluation of the equatorial coordinates of asteroid it is estimated coordinates on CCD-frame]. *Information processing systems*, 2010, **6**(87), 172-179.
8. **Zacharias, N., Gaume, R., Dorland, B., Urban, S. E.** Catalog Information and Recommendations, U.S. Naval Observatory [Web] [http://ad.usno.navy.mil/star/star\\_cats\\_rec.html](http://ad.usno.navy.mil/star/star_cats_rec.html)
9. **Zacharias, N.** The fourth US naval observatory CCD astrogaph catalog (UCAC4). *The Astronomical Journal*, 2013, **145**(2), 44 p., doi: 10.1088/0004-6256/145/2/44.
10. **Savanevych, V. E., Movsesian, Ia. S., Dikhtyar, N. Yu.** Metod formirovaniya vnutrennego kataloga ob'ektov, nepodviznyh na serii kadrov [The method of forming an internal directory objects, fixed on a series of frames]. *Information processing systems*, 2016, **8**(145), 44-49.
11. **Robin, M. G.** Spherical Astronomy. *Cambridge University Press*, 1985, 520 p.
12. **Garrett, John, Steve, En-Hsin, Mallory, Chihway.** Modelling Image Distortions from Atmospheric Turbulence in Wide-Field Astronomical Imaging Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, **1**(9), 1-10.
13. **Martin, R., Petr P, Pavel K** Processing of the Astronomical Image Data obtained from UWFC Optical Systems. *SPIE Digital Library*, 2008, **7076**, 1-11, doi: 10.1117/12.794858.
14. **Maksutov, D. D.** Astronomicheskaja optika [Astronomical optics]. *Moscow: Nauka*, 1984, 272 p.
15. **McLean, I. S.** Electronic Imaging in Astronomy. *Detectors and Instrumentation (Second Edition)*. *Springer-Praxis*, 2008, 592 p.
16. **Calabretta, M. R., Greisen E. W.** Representations of celestial coordinates in FITS. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, **39**, 1077-1122, doi: 10.1051/0004-6361:20021327.
17. **Kiselev, A. A.** Teoreticheskie osnovaniya fotograficheskoy astrometrii [The theoretical foundation of photographic astrometry]. *Moscow: Nauka*, 1989, 264 p.
18. **Ermakov, S. M., Zhigl'janskij, A. A.** Matematicheskaja teorija optimal'nogo eksperimenta [The mathematical theory of optimal experiment]. *Moscow: Nauka*, 1987, 320 p.
19. **Hogg, D. W., Blanton, M., Lang, D.** Automated Astrometry. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, R. W. Argyle, P. S. Bunclark, and J. R. Lewis, eds., ASP Conference Series, 2008, **394**, 27-34.
20. **Sasian, M. J.** Introduction to aberrations in optical imaging systems. *Cambridge University Press*, 2013, 261 p.
21. **Hazewinkel, M.** Encyclopaedia of Mathematics. *Springer Netherlands*, 2001, 732 p.
22. **Günter, D. R.** Compendium of Practical Astronomy: Volume 1: Instrumentation and Reduction Techniques. *Springer Science & Business Media*, 2012, 540 p.
23. **Björck, A.** Numerical Methods for Least Squares Problems. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1996, 408p.
24. **Predrag, S., Marko, P.** Computing generalized inverse of polynomial matrices by interpolation. *Applied mathematics and computation*, 2006, 508 p.
25. **Dax, A.** A modified Gram–Schmidt algorithm with iterative orthogonalization and column pivoting. *Linear Algebra and its Applications*, 2000, **310**, 25-42, doi: 10.1016/S0024-3795(00)00022-7.
26. **ALGLib** [Web] <http://www.alglib.net>
27. **Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, V. E., Kozhuhov, A. M., Dikov, E. N., Vlasenko, V. P.** Programma CoLiTec avtomatizirovannogo obnaruzhenija nebesnyh tel so slabym bleskom [Program CoLiTec automated detection of celestial bodies with slight shine]. *Kosmična nauka i tehnologija*, 2012, **18**(1), 39-46.
28. **Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, A. B., Ivashchenko, Yu. N., Vavilova, I. B., Bezkrorny, M. M., Dikov, E. N., Vlasenko, V. P., Sokovikova, N. S., Movsesian, Ia. S., Dikhtyar, N. Yu., Elenin, L. V., Pohorelov, A. V., Khlamov, S. V.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2015, **31**(6), 302-313.
29. **Bezkrorny, M. M., Dashkova, A. N., Sokovikova, N. S., Savanevych, V. E., Briukhovetskyi, A. B.** Metody issledovanija statisticheskikh karakteristik CCD-izmerenij polozhenij i bleska ob'ektov solnechnoj sistemy [Methods of statistical research-cal characteristics of the CCD-measurement of the provisions and shine solar system objects]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, **2/2**(22), 26-37, doi: 10.15587/2312-8372.2015.40820.

**Сведения об авторах (About authors)**

**Погорелов Артём Витальевич** – аспирант кафедры Электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: pogartem@rambler.ru

**Artem Pohorelov** – Postgraduate student, Department of Electronic computer, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: pogartem@rambler.ru

**Саваневич Вадим Евгеньевич** – д.т.н., профессор, кафедра информационных управляющих систем и технологий, Ужгородский национальный университет, Ужгород; e-mail: vadyum@savanevych.com

**Savanevych Vadym** – Doctor of Technical Sciences (Sc. D.), Professor, Department of Informative and Operating Systems and Technologies, Uzhhorod National University, Kharkiv, Uzhhorod; e-mail: vadyum@savanevych.com

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Погорелов, А. В.** Оценка экваториальных координат объектов на цифровом кадре для длиннофокусных и короткофокусных телескопов / **А. В. Погорелов, В. Е. Саваневич** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 147-157. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.22.

*Please cite this article as:*

**Pohorelov, A. V., Savanevych, V. E.** Assessment of objects equatorial coordinates on the digital frames for long-focus and short-focus telescopes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 147-157, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.22.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Погорелов, А. В.** Оцінка екваторіальних координат об'єктів на цифровому кадрі для довгофокусних і короткофокусних телескопів / **А. В. Погорелов, В. Е. Саваневич** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 147-157. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.22.

**АНОТАЦІЯ** У статті розглянуті обчислювальні методи визначення екваторіальних координат небесних об'єктів за оцінкою їх положення на цифровому кадрі. Розроблені методи враховують особливості астрономічної редукції у довгофокусних і короткофокусних оптичних системах. Для кожної з них проведено порівняльний аналіз точності положення об'єктів при застосування розглянутих методів. Результати аналізу показали обґрунтованість застосування методів прямої координатної редукції для кадрів, отриманих з використанням довгофокусних оптичних систем і зворотної для кадрів з короткофокусних оптичних систем.

**Ключові слова:** цифровий кадр, небесний об'єкт, астрономічні спостереження, оцінка показників точності, оптичні системи, астроредукція.

*Поступила (received) 09.06.2016*

УДК 664.644.5

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.23

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВПЛИВ ЯКОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ НА ХЛІБОПЕКАРНІ ВЛАСТИВОСТІ ПШЕНИЧНОГО БОРОШНА

**О. О. СИМАНОВА\*, Ю. М. КОРЕНЕЦЬ, В. О. ГЛУШКО**

*Кафедра технології в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи, Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, Кривий Ріг, УКРАЇНА*

\*email: simakovaolgaal@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У статті наведено результати досліджень впливу якості питної води на хлібопекарні властивості пшеничного борошна. Проведені експерименти по вивченню впливу важких металів, які містяться у питній воді, на дію як амілолітичних, так і протеолітичних ферментів пшеничного борошна, що відіграє дуже важливу роль в забезпеченні якості готового виробу. З метою вивчення денатурації білку під дією наведених катіонів металів була розроблена методика і проведений модельний експеримент, в якому ми спостерігали випадання осаду в 2%-вих водних розчинах яєчного альбуміну під дією цих металів.

**Ключові слова.** Пшеничне борошно, клейковина, вода, амілолітичні та протеолітичні ферменти, катіони, важкі метали.

## RESEARCH AND EFFECT OF DRINKING WATER ON BREAD-MAKING PROPERTIES OF WHEAT FLOUR

**O. SIMAKOVA\*, Yu. KORENETS, V. GLUSHKO**

*Department of Technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant business, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, UKRAINE*

**ABSTRACT** The object of the article is a research of effect of drinking water on bread-making properties of wheat flour. The article presents research results of the effect of drinking water on bread-making properties of wheat flour. Have been made the experiments on the effect of heavy metals contained in the water on action of wheat flour amylolytic and proteolytic enzymes, which plays a very important role in quality assurance of the finished products. Was studied the amylolytic activity of wheat flour in presence of lead and nickel cations. Have been studied proteolytic activity of wheat flour, namely: yield and quality of gluten during laundering it from a dough, prepared on the water with impurities of lead and nickel cations; the dependence of the diffusion capacity for the roll of laundered from wheat flour substance on impurities of heavy metal cations; change in relative viscosity of 2% gelatin solution under the action of wheat flour proteases, depending on the solvent. For the purpose of study the protein denaturation under the influence of above-mentioned metal cations we have developed a layout and carried out a model experiment, in which we observed setting of sediment in 2% aqueous solution of egg albumin under the influence of these metals. Our studies indicate that the water contaminated with heavy metal impurities, particularly nickel and lead may cause deterioration of the gassing ability of semi-finished dough products. All the tests we have done confirm the fact that the heavy metal cations take a heavy toll on the biological activity of proteolytic enzymes of wheat flour, they block the elasticity of gluten, which may adversely affect the protein network of dough during baking and as a consequence, the quality of the finished product. Therefore, contamination of the water used to prepare the dough in the bread baking processes, especially such water pollutants as heavy metal cations, which are inhibitors of most enzymes, plays a very important role in ensuring the quality of the finished product that requires careful control of its purity.

**Keywords** Wheat flour, gluten, water, amylolytic and proteolytic enzymes, cations, heavy metals.

### Вступ

Різні продукти з пшеничного борошна, зокрема вироби з дріжджового тіста й, особливо, хліб, все ще складають основу харчування людини [1, 2]. Тому якість та харчова цінність хліба, як продукту щоденного споживання, має першорядне значення. Проблема харчової цінності хліба набуває особливої гостроти в ті періоди, коли за яких-небудь причин значно зменшується споживання харчових продуктів тваринного походження – яєць, молока, сиру, м'яса, тваринних жирів, та відносно зростає в дієті частка зернових продуктів, у першу чергу, виробів з борошна. Зрозуміло, що в цих умовах більш одноманітного харчування проблема якості та харчової цінності хліба та можливих шляхів її підвищення стає особливо актуальною. Тому

природно, що протягом багатьох років проводилися дослідження в цій галузі, які не припиняються й досі, тому що проблема не втрачає своєї актуальності й за сучасних умов [3-5]. Усі існуючі на сьогоднішній день методи підвищення харчової повноцінності хліба можна умовно розділити на дві великі групи: збагачення його комплексом цінних біологічно активних речовин та поліпшення споживчих якостей. У деяких випадках ці два шляхи збігаються [13], як то у випадку підвищення активності ферментного комплексу пшеничного борошна, в якому велика роль належить амілолітичним та протеолітичним ферментам. Вони відповідають за накопичення у тісті вільних амінокислот та цукрів, формування хрусткої коричневої скоринки і взагалі відіграють першорядну роль у забезпеченні якості готового виробу.

Але відомо [6], що як амілолітичні, так і протеолітичні ферменти у різних субстратах дуже чутливі до самих незначних змін у навколишньому середовищі. Особливий вплив на їх активність оказують різні хімічні речовини – деякі з них активують ферменти, а інші – інгібують, позбавляючи ферменти активності. Одними з найвідоміших інгібіторів більшості ферментів є катіони важких металів [15]. Якщо вони потрапляють навіть у малих кількостях до рецептурної суміші при виготовленні тіста, це може привести до погіршення якості готового виробу [12-17]. При складанні рецептур тіста для виготовлення різноманітних виробів з пшеничного борошна дуже мало уваги приділяють такому важливому рецептурному компоненту як вода, яка здебільшого береться з міської водопровідної мережі. Але зараз відомо, що протягом останніх десятиліть спостерігається постійне погіршення якості води поверхневих водоймищ, річок і, як наслідок цього, погіршення якості питної води [13]. Це обумовлено кількома причинами. Перш за все спостерігається зростання споживання прісної води промисловими та сільськогосподарськими підприємствами, які після забруднення використаної води викидають її в поверхневі водоймища. Особливу небезпеку викликає при цьому постачання у водоймища катіонів важких металів, як необхідних компонентів стічних вод гальваноцехів, серед яких неабияка кількість нікелю, цинку та ін. [7].

У теперішній час багато вчених почали займатися проблемами якості питної води та її впливу на здоров'я людини, яка стала дуже актуальною у зв'язку з неблагоприємним екологічним становищем у світі [8-11].

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження якості питної води на хлібопекарні властивості пшеничного борошна.

### Виклад основного матеріалу

Прошло тридцять років з величезної катастрофи, що тільки знало людство, вибуху на Чорнобильській атомній електростанції, яка привела до інтенсивного забруднення значної площі України. Поряд з радіоактивним, дуже велику небезпеку становить забруднення навколишнього середовища важкими металами, одним з найтоксичніших серед яких є свинець. Підвищення вмісту свинцю в атмосфері України за ці роки пов'язано з тим, що саме цей метал намагалися використати на самому початку аварії з метою екранування зруйнованого реактора. При цьому сотні тон свинцю випарилися й надійшли до атмосфери, а згодом – і до ґрунту. Нами проведені експерименти по вивченню впливу важких металів на дію як амілолітичних, так і протеолітичних ферментів пшеничного борошна.

В якості об'єктів дослідження обрані два метали – свинець та нікель у формі їх солей.

Активність амілаз пшеничного борошна в присутності катіонів важких металів оцінювали за кількістю утвореної в реакційній суміші мальтози – продукту глибокого оцукрювання крохмалю борошна.

Вплив катіонів важких металів на протеолітичну активність ферментів пшеничного борошна оцінювали за виходом сирови та сухої клейковини при замішуванні тіста, порівнюючи вихід клейковини з тіста, яке готувалося на дистильованій воді і на воді, яка вміщувала 0,05г/л катіонів свинцю, або нікелю. Слід відмітити, що білковий комплекс клейковини тіста при замішуванні піддається дії ферментів-протеаз, які гідролізують білки до вільних амінокислот, які збагачують тісто, надають азотисте харчування дріжджам та сприяють реакції Майяра, наслідком якої є утворення коричневої хрусткої скоринки готового хліба. Клейковину в експериментах відмивали з тіста після його відлежування протягом 1,5 години.

Дуже зручним засобом встановлення активності протеолітичних ферментів сировини є вимірювання відносної грузькості розчинів желатину під дією препаратів, активність яких досліджується. Ми провели експеримент по вивченню відносної грузькості розчину желатину під дією протеолітичних ферментів пшеничного борошна у присутності катіонів свинцю та нікелю. Відносну грузькість розчинів желатину знаходили за допомогою капілярного віскозиметру ВПЖ-2 з діаметром капіляру 0,56мм у воднім термостаті. Термостатування розчинів проводили з точністю до 0,1°C. Видержування системи до початку вимірювання складало не менш 15 хвилин. Перед дослідом розчини фільтрували через фільтри Шотта. Відносну грузькість розраховували за формулою (1):

$$\eta = \frac{t_{\text{розчину}}}{t_{\text{розчинника}}} \quad (1)$$

де:  $\eta$  - відносна грузькість;

$t_{\text{розчину}}$  – час витікання розчину, сек.;

$t_{\text{розчинника}}$  – час витікання розчинника, сек.

З метою вивчення денатурації білку під дією наведених катіонів металів нами була розроблена методика і проведений модельний експеримент, в якому ми спостерігали випадення осаду в 2%-вих водних розчинах яєчного альбуміну під дією цих металів. Випадення осаду характеризує протікання процесу денатурації білку, коли порушується його третинна і, частково, вторинна структура, молекула втрачає підпорядковану спіральну конфігурацію і стає хаотичним нагромадженням клубків та петель. Випадення осаду дуже зручно кількісно контролювати за зміненням оптичної щільності розчинів, яку вимірювали на фотоелектроколориметрі КФК-2 у кюветах з товщиною шару 3 см при довжині хвилі 400 нм.

### Обговорення результатів

Експериментальні дані по дослідженню амілолітичної активності пшеничного борошна в присутності катіонів важких металів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 - Амілолітична активність пшеничного борошна в присутності катіонів важких металів

| Катіон металу         | Вміст мальтози, % |
|-----------------------|-------------------|
| Без металу (контроль) | 3,9               |
| Ca <sup>2+</sup>      | 4,5               |
| Pb <sup>2+</sup>      | 1,4               |
| Ni <sup>2+</sup>      | 2,1               |

Проведений експеримент свідчить про те, що катіон свинцю, як це й відомо з літератури [5], є найбільш сильним інгібітором ферментів-амілаз – він майже зовсім припиняє їх діяльність. Катіон нікелю теж інгібує амілази, але менш активно. Напроти, катіон кальцію – відомий активатор ферментних систем – прискорює гідроліз крохмалю амілазами борошна. Ці дані дозволяють зробити висновок, що вода, забруднена домішками важких металів, зокрема, свинцю та нікелю, може спричинити погіршення газоутворюючої спроможності тістового напівфабрикату.

Експериментальні дані по дослідженню кількості та якості клейковини при відмиванні її з тіста, виготовленого на воді з домішками катіонів свинцю та нікелю наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Вихід та якість клейковини при відмиванні її з тіста, виготовленого на воді з домішками катіонів свинцю та нікелю

| Катіон металу         | Вихід клейковини, % |       | Здатність до розтягування, см |
|-----------------------|---------------------|-------|-------------------------------|
|                       | Сирої               | Сухої |                               |
| Без металу (контроль) | 33,0                | 10,2  | 6,8                           |
| Ca <sup>2+</sup>      | 24,0                | 7,4   | 13,5                          |
| Ni <sup>2+</sup>      | 36,0                | 11,1  | 6,8                           |
| Pb <sup>2+</sup>      | 38,8                | 12,0  | 6,8                           |

Наведені у таблиці дані експерименту свідчать про те, що вихід сирої клейковини в тісті, яке було виготовлено на воді з домішками важких металів – свинцю та нікелю, значно виріс порівняно з тістом, виготовленим на дистильованій воді. Це говорить про інгібування протеолітичних ферментів пшеничного борошна цими катіонами. Механізм дії катіонів на ферменти-протеази пов'язаний з їх реакцією з активними бічними функціональними групами білкових молекул ферментів, частіш за всього, з сульфгідрильними групами SH, що порушує третинну структуру ферменту і приводить до його денатурації та втрати активності. З даних експерименту видно, що свинець є більш сильним інгібітором протеаз, що пов'язано, мабуть, з тим, що він є більш сильним окислювачем порівняно з нікелем, і тому більш активно взаємодіє з групами SH, які мають відновлювальні властивості.

З метою порівняння нами був проведений експеримент з клейковиною, відмитою з тіста, виготовленого на воді з додаванням відомого активатора ферментів – катіону кальцію – у концентрації теж 0,05 г/л у перерахунку на метал.

Вихід клейковини різко зменшився, що говорить про прискорення дії протеолітичних ферментів під дією кальцію, який приймає участь у стабілізації третинної структури ферменту та утворенні активного фермент-субстратного комплексу.

Поряд з виходом сирої ми контролювали вихід сухої клейковини, яка прогнозує еластичність білкового каркасу хліба при випіканні тістової заготовки. Вихід сухої клейковини має дуже важливе значення для оцінки процесів, які протікають у білковому комплексі пшеничного борошна, тому що під впливом деяких речовин може підвищуватися здібність білкових молекул до агрегування навколо них молекул води. При цьому підвищується гідратація білків клейковини, вона становиться спроможною утримувати більше зв'язаної води і вихід сирої клейковини зростає. В технології виготовлення виробів з пшеничного борошна такий процес дуже корисний для якості готових продуктів. В такому випадку при висушуванні відмитої сирої клейковини вся зв'язана вода елімінує і вихід сухої клейковини не відрізняється від звичайного. При висушуванні сирої клейковини, одержаної в проведених експериментах, вихід її виявляє таку ж залежність, як і вихід сирої, що повністю виключає можливість підвищеної гідратації білків тіста під дією важких металів, а залишає тільки їх інгібуючу ферменти дію. Здатність же клейковини до розтягування не змінюється в тісті, виготовленому на дистильованій воді та на воді з домішками свинцю та нікелю, і лише в присутності катіону кальцію клейковина стає удвічі еластичнішою.

Ці результати підтверджують висновок про те, що важкі метали інгібують дію ферментів-протеаз, які не розчеплюють білки клейковини. Катіон же кальцію сильно активує ферменти, які при цьому починають активно гідролізувати білки до амінокислот, зменшують їх кількість та молекулярну масу, що надає клейковині слабкості.

Важливим критерієм якості та хлібопекарних властивостей пшеничного борошна є здатність кульки клейковини вагою 10 г до розпливання після годинного відлежування. Дані по здатності клейковини, відмитої з тіста з домішками важких металів, до розпливання наведені в таблиці 3.

Наведені дані експерименту повністю узгоджуються з попередніми – клейковина під дією катіонів важких металів закріплюється, стає менш еластичною.

Експериментальні дослідження відносної грузкості розчинів желатину під дією протеолітичних ферментів пшеничного борошна наведені у таблиці 4.



Таблиця 3 – Залежність здатності до розпливання кульки клейковини, відмитої з пшеничного борошна, від домішків катіонів важких металів

| Катіон металу         | Діаметр кульки, мм |
|-----------------------|--------------------|
| без металу (контроль) | 41                 |
| Pb <sup>2+</sup>      | 37                 |
| Ni <sup>2+</sup>      | 39                 |
| Ca <sup>2+</sup>      | 95                 |

Таблиця 4 – Змінення відносної густоти 2%-вих розчинів желатину під дією протеаз пшеничного борошна залежно від розчинника

| Розчинник                                       | Відносна густота ( $\eta$ ) |
|---|-----------------------------|
| вода  | 1,6                         |
| водний розчин солі свинцю ( $C_{Pb}=0,05$ г/л)  | 1,95                        |
| водний розчин солі нікелю ( $C_{Ni}=0,05$ г/л)  | 2,05                        |
| водний розчин солі кальцію ( $C_{Ca}=0,05$ г/л) | 1,3                         |

Дані, одержані в результаті експерименту, узгоджуються з попередньо одержаними – відносна густота розчину желатину з добавкою пшеничного борошна без добавок катіонів важких металів значно менша порівняно з тою, яка одержана з добавками катіонів свинцю та нікелю. Напевно, ці катіони інгібують дію протеаз пшеничного борошна, які становляться менш активними і більш повільно гідролізують макромолекули желатину. Катіон кальцію, як і в попередніх дослідах, проявляє дуже велику активуючу здібність, він прискорює процес гідролізу желатину, внаслідок чого густота його розчину зменшується. Але в цьому досліді домішки катіонів свинцю значно менше гальмують процес гідролізу порівняно з катіонами нікелю. Ми пояснюємо цей факт не більшою активністю катіону нікелю як інгібітору протеаз пшеничного борошна, а додатковим процесом комплексоутворення між макромолекулою желатину та цим катіоном, що приводить до стабілізації третинної структури желатину і, як наслідок, до підвищення густоти його розчинів. Нікель належить до перехідних металів, які мають вакантні d-орбіталі, що надає йому можливість утворювати додаткові координаційні зв'язки з молекулами субстрату, тобто підвищує його комплексоутворюючу здібність. Цим і пояснюється ще більше зростання густоти розчинів желатину порівняно з домішками катіонів свинцю. Катіон же свинцю належить до р-елементів, які не мають електронних рівней з вакантними d-орбіталами, це позбавляє його властивостей до утворення координаційних зв'язків з електронозбагаченими ділянками білкових молекул желатину.

Фактично проведені експерименти свідчать про те, що білкові молекули протеолітичних ферментів зазнають денатурації під дією катіонів важких металів. Під денатурацією розуміється будь який процес, який порушує четвертинну, третинну і навіть вторинну структуру білкової молекули, змінює її просторову спіральну конфігурацію, не торкаючись ковалентного пептидного зв'язку. Але незважаючи на зберігання основного скелету молекули, її біологічні властивості втрачаються.

Експериментальні дослідження змінення оптичної щільності водних розчинів яєчного альбуміну в присутності катіонів металів з метою вивчення денатурації білку протеолітичних ферментів під дією наведених катіонів металів наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Змінення оптичної щільності водних розчинів яєчного альбуміну в присутності катіонів металів

| Катіон металу         | Оптична щільність, D |
|-----------------------|----------------------|
| Без металу (контроль) | 0,05                 |
| Ca <sup>2+</sup>      | 0,03                 |
| Ni <sup>2+</sup>      | 0,25                 |
| Pb <sup>2+</sup>      | 0,38                 |

Дані експерименту підтверджують факт денатурації білку катіонами важких металів, особливо свинцем і повністю узгоджуються з даними, одержаними при експериментах з клейковиною. Катіон кальцію сприяє стабілізації третинної структури білка і тому прозорість розчину яєчного альбуміну підвищується.

## Висновки

Проведені нами дослідження свідчать про те, що вода, забруднена домішками важких металів, зокрема, свинцю та нікелю, може спричинити погіршення газоутворюючої спроможності тістового напівфабрикату. Усі випробувані нами тести підтверджують той факт, що катіони важких металів згубно впливають на біологічну активність протеолітичних ферментів пшеничного борошна, вони позбавляють клейковину еластичності, що може негативно сказатися на білковому каркасі тіста при його випіканні і, як наслідок, на якості готового виробу. Тому забруднення води, яку використовують для приготування тіста у процесах випікання хліба, особливо катіонами важких металів, які є інгібіторами більшості ферментів, відіграє дуже важливу роль в забезпеченні якості готового виробу, що потребує ретельного контролю її чистоти.

У подальшому для розробки технологічного процесу виробництва виробів з пшеничного борошна будуть досліджені засоби підвищення якості одного із основних рецептурних компонентів – питної води.

## Список літератури

- 1 **Аникеева, Н. В.** Научное обоснование и разработка технологий хлебобулочных изделий функционального значения / **Н. В. Аникеева** // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 1. – С. 77-81.
- 2 **Коршунова, Г. Ф.** Украинское хлебопечение – перспективы развития / **Г. Ф. Коршунова** // *Вестник Меркурия*. – 2006. – № 3. – 10 с.
- 3 **Сімакова, О. О.** Разработка способов повышения качества и пищевой ценности изделий из пшеничной муки / **О. О. Сімакова, Г. В. Руденко** // *Техника и технология пищевых производств. Сборник тезисов докладов участников 6-ой международной конференции студентов и аспирантов*. – МГУП. – 2007. – 122 с.
- 4 **Семенова, Л. Я.** Вплив морської капусти на якісні показники дріжджового тіста / **Л. Я. Семенова** // *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр.* Донецьк: ДонНУЕТ. – 2011. – № 27. – С. 239-244.
- 5 **Семенова, Л. Я.** Вплив ламінарії цукрової на якісні показники дріжджового тіста / **Л. Я. Семенова** // *Вісник ДонНУЕТ. Технічні науки*. – Донецьк: ДонНУЕТ. – 2012. – Вип. № 1 (53). – С. 153-157.
- 6 **Гридина, С. Б.** Ферментативная активность зерновых культур / **С. Б. Гридина, Е. П. Зинкевич, Т. А. Владимирцева, К. А. Забусова** // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2014. – № 8. – С. 57-60.
- 7 **Теплая, Г. А.** Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды / **Г. А. Теплая** // *Астраханский вестник экологического образования*. – 2013. – № 1 (23). – С. 182-192.
- 8 **Сімакова, О. О.** Вплив води на якість хліба / **О. О. Сімакова** // *Swordl. Технічні науки*. – Одеса: Купрієнко, 2012. – Том 10. – С. 88-90.
- 9 **Сімакова, О. О.** Роль качества питьевой воды в производстве хлеба / **О. О. Сімакова, Р. П. Никифоров** // *Вісник ДонНУЕТ. Технічні науки*. – Кривий Ріг: ДонНУЕТ. – 2015. – Вип. № 2 (63). – С. 98-104.
- 10 **Буденный, М. М.** Потребителю о питьевой воде / **М. М. Буденный, В. В. Агарков, В. Н. Леншин**. – Х.: Фактор. – 2010. – 112 с.
- 11 **Волошин, М. Д.** Проблеми підвищення якості питної води / **М. Д. Волошин, О. А. Крюковська, А. В. Іванченко**; Дніпродзержин. держ. техн. університет. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2013. – 268 с.
- 12 **Wasser für Backen**. – 2009. – [Web]: [http://orgprints.org/8714/1/wasser\\_f%C3%BCr\\_backen.pdf](http://orgprints.org/8714/1/wasser_f%C3%BCr_backen.pdf)
- 13 **Tankyan, S. W.** Characterization of drinkink water for baking industry / **S. W. Tankyan** // *Biochemistry of baking*. – 2013. – Vol. 402/1. – P. 18 - 43. – doi:10.1016/j.bcy.2013.04.015.
- 14 **Raily, M. M.** Effects of water solutions on properties of dough / **M. M. Raily, J. P. Hawking** // *Food Sciences*. – 2008. – Vol. 45. – № 3. – P. 304-310. – doi:10.1016/j.foodscien.2008.08.048.
- 15 **Chang, J.** Enzymes and their effect on the quality of dough / **J. Chang, W. Ksiu** // *Food Sciences*. – 2011. – Vol. 15. – № 4. – P. 33-37. – doi: 14.1003/j.foodscien.2010.05.028.
- 16 **Sanamian, K. Yu.** Water chemical reactions and their effect on quality of wheat flour baking products / **K. Yu. Sanamian** // *Journal of Food Biochemistry*. – 2001. – Vol. 19, № 8. – P. 645-651. – doi:10.1053/1.347941.
- 17 **Romadon, M. F.** Oil composition of coriander (*Coriandrum sativum* L.) fruit-seeds / **M.F. Romadon, J.T. Morsel** // *European Food Research and Technology*. – 2002. – Vol.215. – № 3. – P. 204-209.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Anikeyeva, N. V.** Nauchnoye obosnovaniye i razrabotka tekhnologiy khlebobulochnykh izdeliy funktsional'nogo znacheniya [Scientific substantiation and development of technologies of bakery products of a functional purpose]. *Zhurnal Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altay State University], 2012, **1**, 77-81.
- 2 **Korshunova, G. F.** Ukrainskoye khlebopecheniye – perspektivy razvitiya [Ukrainian Bakery - prospects of development] *Vestnik Merkuriva. Zhurnal* [Bulletin of Mercury, Journal], 2006, **3**, 10 p.
- 3 **Simakova, O. O., Rudenko, G. V.** Razrabotka sposobov povysheniya kachestva i pishchevoy tsennosti izdeliy iz pshenichnoy muki [Developing ways to improve the quality and nutritional value of products from wheat flour]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. Sbornik tezisov dokladov uchastnikov 6-oy mezhdunarodnoy konferentsii studentov i aspirantov* [Abstracts of the participants of the 6th International Conference of students and graduate students], MGUP, 2007, 122 p.
- 4 **Semenova, L. Ya.** Vpliv mors'koï kapusti na yakisni pokazniki drizhdzhovogo tista [The impact of seaweed on quality indicators of dough]. *Obladnannya ta tekhnologii kharchovikh virobnitstv: temat. zb. nauk. pr.* [Equipment and technology of food production: scientific research journal], Donetsk: DonNUYET, 2011, **27**, 239-244.
- 5 **Semenova, L. Ya.** Vpliv laminarii tsukrovoi na yakisni pokazniki drizhdzhovogo tista [The impact of sugar kelp on quality indicators of dough]. *Visnik DonNUYET. Tekhnichni nauky* [Bulletin of DonNUET, Technical sciences], Donetsk: DonNUYET, 2012, **1(53)**, 153-157.
- 6 **Gridina, S. B., Zinkevich, Ye. P., Vladimirtseva, T. A., Zabusova, K. A.** Fermentativnaya aktivnost' zernovykh kul'tur [The enzymatic activity of cereals]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State University], 2014, **8**, 57-60.
- 7 **Teplaya, G. A.** Tyazhelye metally kak faktor zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Heavy metals as a factor of environmental pollution]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. [Astrakhan bulletin of ecological education], 2013, **1(23)**, 182-192.
- 8 **Simakova, O. O.** Vpliv vody na yakist' khliba [Effect of water on quality of dough]. *Swordl. Tekhnichni nauky* [Swordl. Technical Sciences], Odesa: Kupriyenko, 2012, **10**, 88-90.
- 9 **Simakova, O. O., Nikiforov, R. P.** Rol' kachestva pit'yevoy vody v proizvodstve khleba [The role of the quality of drinking water in the production of bread]. *Visnik DonNUYET. Tekhnichni nauky* [Bulletin of DonNUET, Technical sciences], Kriviy Rih: DonNUYET, 2015, **2(63)**, 98-104.
- 10 **Budennyi, M. M., Agarkov, V. V., Len'shin, V. N.** Potrebiteleyu o pit'yevoy vode [For customer about drinking water], Kharkiv: Faktor, 2010, 112 p.
- 11 **Voloshyn M. D., Kryukov's'ka, O. A., Ivanchenko, A. V.** Problemy pidvishchennya yakosti pitnoyi vody [Problems of improving the quality of drinking water]. *Dniprodzerzhyn. derzh. tekhn. Universytet* [Dniprodzerzhynsk National Technical University], Dniprodzerzhinsk: DDTU, 2013, 268 p.
- 12 **Wasser für Backen**, 2009, [Web]: [http://orgprints.org/8714/1/wasser\\_f%C3%BCr\\_backen.pdf](http://orgprints.org/8714/1/wasser_f%C3%BCr_backen.pdf).
- 13 **Tankyan, S. W.** Characterization of drinkink water for baking industry. *Biochemistry of baking*, 2013, **402/1**, 18-43, doi: 10.1016/j.bcy.2013.04.015.
- 14 **Raily, M. M., Hawking, J. P.** Effects of water solutions on properties of dough. *Food Sciences*, 2008, **45(3)**, 304-310, doi:10.1016/j.foodscien.2008.08.048.

- 15 **Chang, J., Ksiu, W.** Enzymes and their effect on the quality of dough. *Food Sciences*, 2011, **15**(4), 33-37, doi:14.1003/j.foodscien.2010.05.028.
- 16 **Sanamian, K. Yu.** Water chemical reactions and their effect on quality of wheat flour baking products. *Journal of Food Biochemistry*, 2001, **19**(8), 645-651, doi:10.1053/1.347941.
- 17 **Romadon, M. F., Morsel, J. T.** Oil composition of coriander (*Coriandrum sativum* L.) fruit-seeds. *European Food Research and Technology*, 2002, **215**(3), 204-209.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Сімакова Ольга Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, доцент кафедри технологій в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи; м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: simakovaolgaal@gmail.com.

**Olga Simakova** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Docent of the Department of Technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant business; Kryvyi Rih, Ukraine; e-mail: simakovaolgaal@gmail.com.

**Коренець Юрій Миколайович** – Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, старший викладач кафедри технологій в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи; м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: yuriu\_korenec@mail.ru.

**Yurii Korenets** – Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Senior Lecturer of the Department of Technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant business; Kryvyi Rih, Ukraine; e-mail: yuriu\_korenec@mail.ru.

**Глушко Вікторія Олексіївна** – Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, асистент кафедри технологій в ресторанному господарстві та готельної і ресторанної справи; м. Кривий Ріг, Україна; e-mail: viki9327@mail.ru.

**Viktoriia Glushko** – Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Assistant of the Department of Technology in the restaurant sector and the hotel and restaurant business; Kryvyi Rih, Ukraine; e-mail: viki9327@mail.ru.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Сімакова, О. О.** Дослідження та вплив якості питної води на хлібопекарні властивості пшеничного борошна / **О. О. Сімакова, Ю. М. Коренець, В. О. Глушко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.23.

*Please cite this article as:*

**Simakova, O., Korenets, Yu., Glushko, V.** Research and effect of drinking water on bread-making properties of wheat flour. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 158-163, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.23.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Симакова, О. А.** Исследование и влияние качества питьевой воды на хлебопекарные свойства пшеничной муки / **О. А. Симакова, Ю. Н. Коренец, В. А. Глушко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.23.

**АННОТАЦІЯ** В статті приведено результати досліджень впливу якості питної води на хлібопекарні властивості пшеничної муки. Проведено експерименти по вивченню впливу важких металів, що містяться в питній воді, на дію як амілолітичних, так і протеолітичних ферментів пшеничної муки, що грає дуже важливу роль в забезпеченні якості готового продукту. С метою вивчення денатурації білка під дією наведених катионів металів була розроблена методика і проведено модельний експеримент, в якому спостерігалося випадіння осаду в 2%-них водних розчинах яєчного альбуміну під дією цих металів.

**Ключові слова.** Пшенична мука, клейковина, вода, амілолітичні і протеолітичні ферменти, катіони, важкі метали.

Надійшла (received) 15.08.2016

УДК 663.253.3

doi:10.20998/2413-4295.2016.25.24

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБУ ПЕРЕРОБКИ ВИНОГРАДУ НА ФЕНОЛЬНИЙ КОМПЛЕКС СТОЛОВИХ ВИН

О. В. ЦИГАНКОВА\*, М. В. БІЛЬКО

Кафедра біотехнології продуктів бродіння і виноробства, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА  
\*email: cygankova@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Представлені результати досліджень фенольного комплексу рожевих і червоних виноматеріалів із винограду сортів Санджовезе, Сіра, Пті Вердо. Встановлено, що спосіб переробки винограду істотно впливає на якісний і кількісний склад фенольного комплексу. Висока масова концентрація біофлавоноїдів була в схемах переробки винограду, що передбачали підброджування і бродіння м'язги. Проведено порівняльний аналіз органолептичних, фізико-хімічних і оптичних показників якості виноматеріалів. Перспективні для України сорти винограду Санджовезе, Сіра, Пті Вердо мають хороший потенціал для отримання вин з високою біологічною цінністю.

**Ключові слова:** способи переробки винограду, виноматеріали, технологічний запас фенольних речовин, флавоноїди, антоціани, катехіни.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GRAPES PROCESSING METHOD ON THE PHENOLIC COMPLEX OF TABLE WINES

О. V. TSYGANKOVA\*, M. V. BIL'KO

Department of Biotechnology of fermentation products and winemaking, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The aim of the work is to find the effect of grapes processing method on the phenolic complex of the wine stock. The test material was pink and red dry table wine stock, prepared according to various schemes of grape varieties Petit Verdot, Sangiovese, Syrah, Cabernet Sauvignon (check). The determination of phenolic compounds was performed according to the method with the chromatograph Agilent Technologies, Model 1100. The results of the chromatographic analysis made it possible to determine a significant difference between qualitative composition and quantitative content of anthocyanins, other bioflavonols and non-condensed tannins in wine stock produced from grapes of different varieties. The highest content of phenolic compounds was in wine stocks from the grapes Petit Verdot, the smallest was in Syrah. Wine stocks from Cabernet Sauvignon were characterized by the high level of anthocyanins, although the high content of these compounds was observed in Petit Verdot also. Anthocyanins in all grape varieties were introduced mainly by malvidin-3-O-glycosides and their derivatives. It has been found that the method of processing grapes affects the mixing ratio of the phenolic complex.

The content of these compounds was observed in Petit Verdot also. The highest content of anthocyanins was in wine stocks of Syrah and Petit Verdot varieties produced by the way of pulp hypo-fermentation, while in the wine stocks of Cabernet Sauvignon and Sangiovese – of pulp fermentation, that indicates the differences of grape varieties to dyes donation. Cryomaceration provides an opportunity to increase the content of such valuable bioflavonols as catechin and epicatechin in almost every unblended wine stock. Wine processing using the "white" method makes it possible to obtain rose wines that contain mainly kaftaric acid and epicatechin. Anthocyanin complex is represented mainly by malvidin-3-O-glycosides. The method of infusion on the seeds and skins compared to processing using the "white" method increases the content of epicatechins on an average twice, the anthocyanin content – from 3 to 5 times depending on the variety. The proposed technological wine production schemes make it possible to get the wine stocks that are not inferior to the check sample on the content of flavonols.

**Key words:** grapes processing method, wine stocks, technological stock of phenolic substances, flavonols, anthocyanins, catechins.

### Вступ

Сучасні тенденції здорового харчування сприяють розвитку технологій продуктів, що мають біологічну цінність для здоров'я людини. До таких продуктів відносяться й натуральні столові вина, про корисність яких було відмічено у багаточисленних дослідженнях українських і закордонних вчених (Г. Г. Валуйко, А. Я. Ялонцький, В. А. Макросов, Н. М. Агеева, С. Flanzu, G. Masson, J. Ryan) [1–5].

Найбільшу цінність мають червоні столові вина, які характеризуються антиоксидантними, антивірусними, бактерицидними властивостями та мають Р-вітамінну активність, зміцнюючи стінки судин, завдяки значному вмісту біофлавоноїдів. Разом

з цим вчені відмічали, в основному, виноград сорту Каберне-Совіньон як такий, в якому найбільше виражені вказані властивості [6–11].

Дослідження останніх років (В. А. Волинкин, З. В. Котоловец) [12–13], визначили європейські червоні сорти винограду Сіра, Санджовезе, Пті Вердо як перспективні для культивування і виробництва столових вин в Україні.

Виходячи з вищесказаного, дослідження в аспекті біологічної цінності столових вин з винограду сортів Сіра, Санджовезе, Пті Вердо культивованих в Україні представляють певну цікавість й є предметом досліджень даної роботи.

### Мета роботи

Мета роботи полягає у встановленні впливу способів переробки винограду на органолептичні, фізико-хімічні показники якості отриманих виноматеріалів та їх біологічну цінність на основі вивчення фенольного комплексу.

### Викладення основного матеріалу

Матеріалами дослідження були рожеві і червоні столові сухі виноматеріали, вироблені з винограду сортів Сіра, Санджовезе, Пті Вердо, Каберне-Совіньйон (контроль). Виноматеріали виробляли за п'ятьма технологічними схемами: «по-білому» способом; настоюванням м'язги при температурі не більше 6 °С протягом 5 діб (кріомацерація) і 18–20 годин при температурі 20 °С; підброджування до об'ємної частки спирту 2–3 %; бродінням на м'яззі до 50 % залишкових цукрів.

Бродіння проводили на расі активних сухих дріжджів ЄС 1118 (Lallemand, Франція) з використанням підкормки для дріжджів Вітамол Комбі (Erbsloeh Geisenheim, Німеччина).

Після освітлення і зняття з дріжджів, в виноматеріалах підтримували масову концентрацію вільного діоксиду сірки на рівні 25–30 мг /дм<sup>3</sup>.

У винограді досліджували технологічні запаси фенольних та барвних речовин і ступінь переходу їх у сусло за методикою РД 0033483.042 [14], у суслі – фізико-хімічні показники, оптичні характеристики [15].

У зразках виноматеріалів визначили органолептичні і фізико-хімічні показники якості, оптичні характеристики згідно з прийнятими в виноробстві методиками [15]. Визначення якісного складу фенольних сполук та їхніх масових концентрацій проводили за методикою на хроматографі фірми Agilent Technologies, модель 1100. Органолептичну оцінку проводили за 8-бальною шкалою [16].

### Обговорення результатів

Першим етапом дослідження було встановлення кондицій сортів винограду при культивуванні в умовах України на відповідність вимогам чинних нормативних документів (ДСТУ2366) при виробництві столових вин. Результати фізико-хімічних показників винограду приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники винограду

| Показники                                | Сорти винограду |       |       |       | ДСТУ 2366 |
|--|-----------------|-------|-------|-------|-----------|
|  | С               | СД    | ПВ    | КС    |           |
| Масова концентрація, г/дм <sup>3</sup> : |                 |       |       |       |           |
| - цукрів                                 | 185,0           | 188,0 | 215,0 | 191,0 | ≥170      |
| - титрованих кислот                      | 7,83            | 7,24  | 8,76  | 8,65  | 7-10      |
| pH                                       | 3,10            | 3,20  | 3,05  | 3,25  | 3,0-3,3   |

Примітка: С – Сіра, СД – Санджовезе, ПВ – Пті Вердо, КС – Каберне-Совіньйон

Результати аналізів свідчать про те, що ці сорти в умовах України визрівають і мають кондиції, що дозволяють їх переробляти на столові вина.

Аналіз запасу фенольних речовин у винограді сортів, що досліджували, дозволив встановити, що вони різняться за цими показниками.

Найбільшим технологічним запасом (ТЗ) фенольних сполук характеризуються Санджовезе та Сіра, а Пті Вердо найменшим. ТЗ антоціанів зменшується у ряді Каберне-Совіньйон → Сіра → Пті Вердо → Санджовезе (рис. 1).

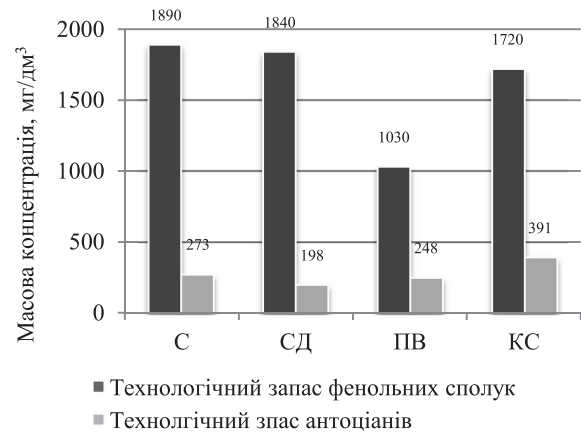


Рис. 1 – Технологічний запас фенольних сполук та антоціанів у винограді сортів: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньйон

Однак, сорти винограду мають різну ступінь віддачі цих речовин у сусло при їх переробці (рис. 2).

Найбільшою здатністю до переходу фенольних сполук (ФС) характеризується виноград сорту Пті Вердо.

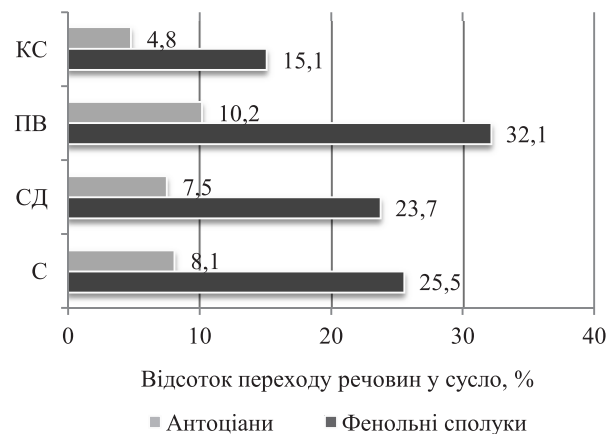


Рис. 2 – Перехід фенольних сполук та антоціанів у сусло: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньйон

Значення показнику інтенсивності кольору суслу (I) коливались в межах 0,075–0,160 залежно від сорту, а відтінку кольору (T) – 0,360–1,133 (рис. 3, 4).

Найбільшим показником інтенсивності забарвлення суслу характеризувався виноград сорту Пті Вердо, що вказує на більш високий вміст фенольних речовин, які при переробці переходять у сусло. У сорті Каберне-Совіньон, незважаючи на найбільший запас антоціанів, найменший показник інтенсивності забарвлення.

Високий показник відтінку забарвлення був відмічений у винограді сорту Пті Вердо, що вказує на схильність його до окислення. Цю властивість необхідно враховувати при його переробці.

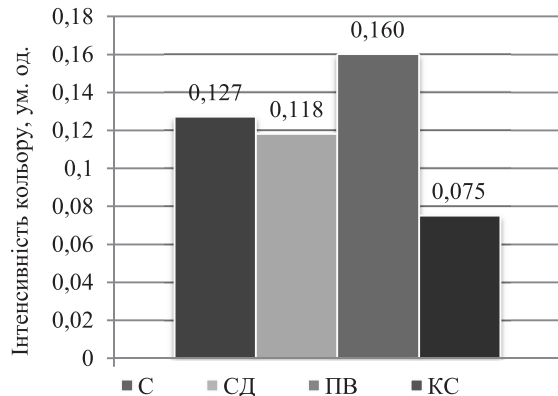


Рис. 3 – Інтенсивність забарвлення (I) сусла: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон

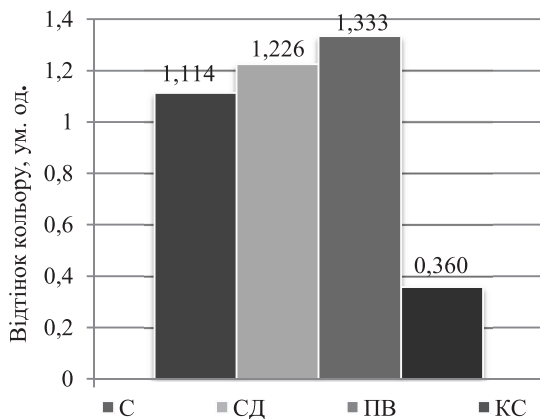


Рис. 4 – Відтінок забарвлення (T) сусла: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон

Наступним етапом роботи було дослідження впливу різних технологічних прийомів переробки винограду на формування органолептичних, фізико-хімічних показників якості виноматеріалів і їхній фенольний комплекс.

Органолептичний аналіз отриманих зразків виноматеріалів дозволив встановити, що вони розрізнялися кольором, мали цікаву ароматику з відтінками барбарису, чорної смородини, льодяників, грейпфруту, з гармонічним танінним смаком.

Результати органолептичної оцінки представлені в табл. 2.

Виноматеріали, отримані з сортів винограду Сіра, Санджовезе, Пті Вердо і Каберне-Совіньон мали фізико-хімічні показники, відповідні вимогам, що висуваються до столових сухих вин по ДСТУ 4805.

Результати досліджень приведені у табл. 3

Таблиця 2 – Органолептичні показники якості виноматеріалів

| Сорт       | Схема | Органолептична оцінка  | Середній бал |
|------------|-------|--|--------------|
| 1          | 2     | 3  | 4            |
| Сіра       | I     | колір ніжно-рожевий з тілесним відтінком, персиковий; аромат свіжий, тонкий, чистий, трав'янистий; смак гармонійний, легка гірчинка у післясмакові | 7,75         |
|            | II    | колір рожево-червоний; аромат тонкий, легкі тони червоної смородини; смак округлий   | 7,80         |
|            | III   | колір насичений червоно-рубіновий; аромат свіжий, гармонійний з тонами червоної смородини; смак простий  | 7,60         |
|            | IV    | колір насичений рубіновий; аромат свіжий, гармонійний з тонами червоної смородини; смак вершково-фруктовий   | 7,70         |
|            | V     | колір насичений рубіновий; аромат сорту слабкий; смак танінний, злагоджений, з тонами чорної смородини   | 7,65         |
| Санджовезе | I     | колір світло-рожевий, пелюстків троянд; аромат грейпфрутовий, сицилійський апельсин; смак деревинний, з цитрусовою ноткою                          | 7,90         |
|            | II    | колір яскраво-малиновий; аромат квітково-плодовий; смак вершковий, льодяниковий  | 7,75         |
|            | III   | колір червоний; аромат чистий, ягідно-фруктовий; смак м'який, гармонійний  | 7,85         |
|            | IV    | колір рубіновий, насичений; аромат з тонами гранату, вишні; смак простий, танінний   | 7,60         |
|            | V     | колір гранатово-рубіновий; аромат вишні, шовковиці, вершковий; смак з карамельними тонами, насичений,  | 7,85         |
| Пті Вердо  | I     | колір сьомги, ніжно рожевий, пелюстків троянд; аромат з квітковими та ягідними тонами; смак ягідний, легкий барбарис                               | 7,80         |
|            | II    | колір рожево-червоний; аромат свіжий з саф'яноювою ноткою; смак округлий, пасльоновий  | 7,72         |
|            | III   | колір світлого рубіну; аромат ягідний з карамельними тонами; смак ягідно-карамельний з легкою терпкістю  | 7,77         |
|            | IV    | колір гранатового соку; аромат з саф'яновими та карамельними тонами; смак танінний, гармонійний  | 7,82         |
|            | V     | колір рубіновий; аромат злагоджений, саф'яновий; смак пасльоновий, танінний; має показники до витримки   | 7,85         |

Продолжение табл. 2

| 1                | 2   | 3  | 4    |
|------------------|-----|--|------|
| Каберне-Совіньон | I   | колір малиновий; аромат льодяниковий, барбарисовий; смак чистий, гармонійний                           |      |
|                  | II  | колір світло-червоний; аромат свіжий з тонами сухофруктів; смак пасльоновий, вершковий, насичений      | 7,80 |
|                  | III | колір червоний; аромат свіжий; смак пасльоновий з приглушеною танінністю, гармонійний                  | 7,75 |
|                  | IV  | колір червоний; аромат свіжий з тонами сухофруктів; смак пасльоновий з саф'яновими тонами, з кислінкою | 7,65 |
|                  | V   | колір гранатовий; аромат чорносливу з саф'яновим тоном; смак танінний, післясмак насіння соняшника     | 7,85 |

та його похідними, які склали 15,8 – 48,1 % залежно від сорту.

Співвідношення груп фенольних речовин у виноматеріалах представлені на рис. 5.

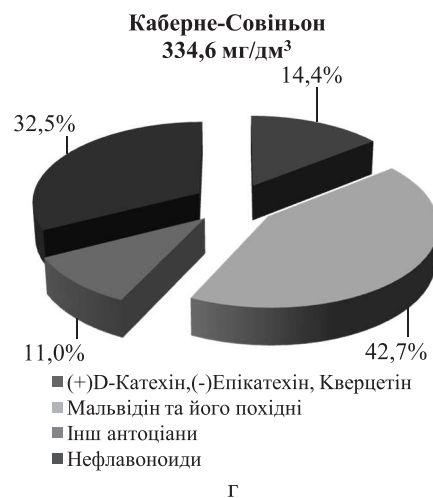
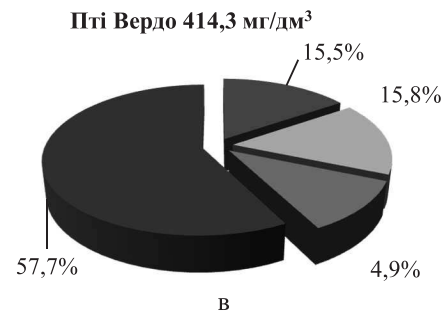
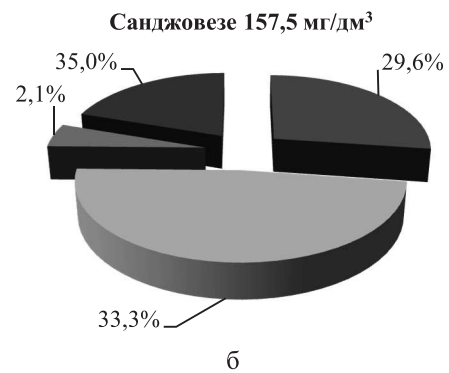
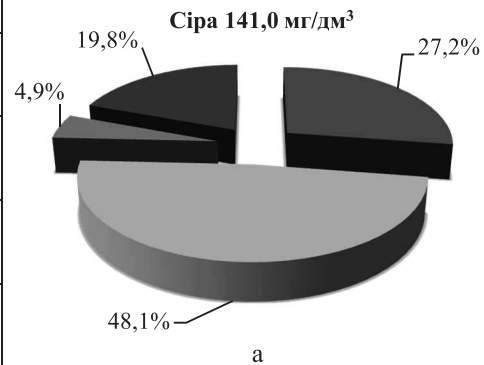


Рис. 5 – Співвідношення груп фенольних речовин у виноматеріалах (середні значення)

Таблиця 3 – Фізико-хімічні показники якості виноматеріалів

| Показники якості   | Виноматеріали столові сухі рожеві та червоні |            |           |                  | Вимоги ДСТУ 4805 |
|--|--|------------|-----------|------------------|------------------|
|  | Сіра   | Санджовезе | Пті Вердо | Каберне-Совіньон |                  |
| Об'ємна частка етилового спирту, %                                 | 10,8-11,0                                    | 11,2-11,3  | 12,5-13,0 | 12,9-13,0        | 9,5-14,0         |
| Масова концентрація цукрів, г/дм³                                  | 2,9-3,0                                      | 2,6-2,8    | 2,0-2,2   | 2,9-3,0          | ≤ 3,0            |
| Масова концентрація титрованих кислот, г/дм³                       | 7,2-7,4                                      | 6,8-6,9    | 7,6-7,7   | 7,5-7,6          | 5,0-8,0          |
| Масова концентрація приведенного екстракту, мг/дм³                 | 15,0-18,15                                   | 15,1-18,9  | 15,7-19,1 | 15,6-18,7        | ≥ 15,0           |
| Масова концентрація летких кислот, мг/дм³                          | 0,36   | 0,30       | 0,36      | 0,42             | ≤ 0,8            |
| Масова концентрація сірчистої кислоти, мг/дм³ (загальної/вільної), | 157/18                                       | 180/15     | 163/20    | 188/14           | ≤ 200/20         |

Результати хроматографічного аналізу дозволили встановити суттєву різницю між якісним складом та кількісним вмістом антоціанів, інших біофлавоноїдів та неконденсованих танінів у виноматеріалах, виготовлених з винограду різних сортів. Найбільшим вмістом фенольних сполук відрізнялись виноматеріали Пті Вердо, найменшим – Сіра. Високим рівнем антоціанів характеризувались виноматеріали з Каберне-Совіньон, хоча високий вміст цих сполук було відмічено й у виноматеріалах із винограду сорту Пті Вердо. Антоціани у всіх виноматеріалах були представлені в основному мальвідін-3-О-глюкозидом

Встановлено, що спосіб переробки винограду впливає на розподіл компонентів фенольного комплексу. Найбільший вміст антоціанів був в виноматеріалах із Сіра і Пті Вердо, вироблених шляхом підброджування м'язги, а у Каберне-Совіньон і Санджовезе – бродінням м'язги, що вказує на відмінності сортів винограду щодо віддачі барвних речовин у виноматеріал.

Прийом підброджування і бродінням м'язги, дозволяє збільшити вміст таких цінних біофлавоноїдів як катехін та епікатехін майже у всіх сортових виноматеріалах. У виноматеріалах із винограду сорту Сіра було відмічено найвищий вміст антоціанів, порівнюючи з іншими сортовими виноматеріалами, виготовленими за технологією кріомасації. Переробка «по білому» способу дає можливість отримати рожеві вина, які містять в основному епікатехін та кафтарову кислоту, а антоціановий комплекс представлений в основному мальвідін-3-О-глюкозидом. Настоювання м'язги сприяє збільшенню вмісту епікатехіну в середньому в 2 рази, а антоціанів в 3-5 разів залежно від сорту.

Масова концентрація кварцетину, катехіну та його похідних у виноматеріалах представлена на рис. 6.

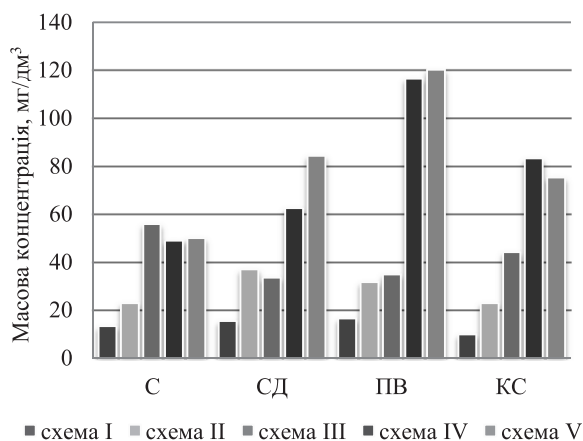


Рис. 6 – Масова концентрація кварцетину, катехіну та його похідних у виноматеріалах: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон

Масова концентрація мальвідину та його похідних у виноматеріалах представлена на рис. 7.

З мономерних нефлавоноїдних фенольних сполук у виноматеріалах ідентифіковані фенолкарбонові кислоти – галова, бузкова, ефіри оксикоричних кислот – кафтарова і каутарова. Масова концентрація цих кислот представлена на рис. 8.

Найбільша кількість фенольних речовин нефлавоноїдного походження була відмічена у виноматеріалах сорту Пті Вердо. Їх вміст знижувався у ряді Каберне-Совіньон → Санджовезе → Сіра.

Залежність вмісту мономерних форм фенольних речовин від способу переробки представлено на рис. 9.

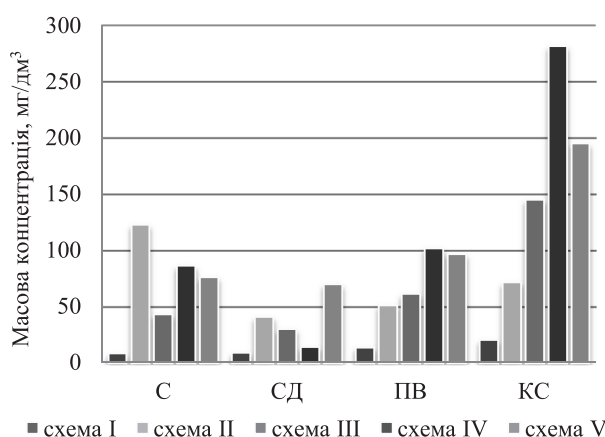


Рис. 7 – Масова концентрація мальвідину та його похідних у виноматеріалах: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон

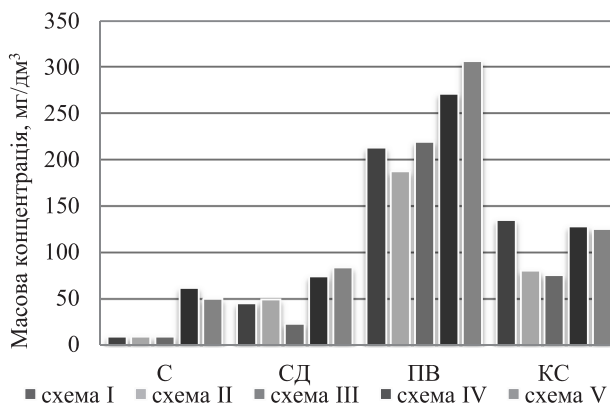


Рис. 8 – Масова концентрація кислот у виноматеріалах: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон

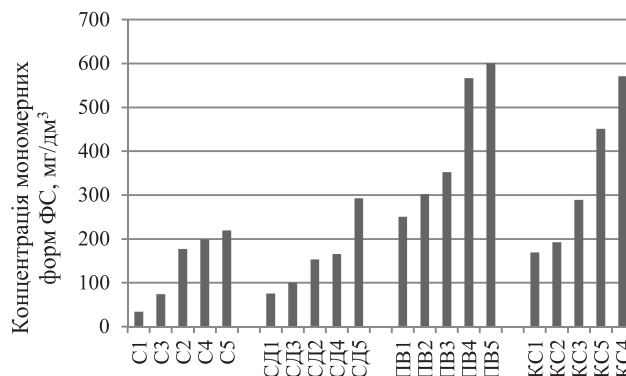


Рис. 9 – Вміст мономерних форм фенольних сполук в залежності від способу переробки у виноматеріалах: С – Сіра; СД – Санджовезе; ПВ – Пті Вердо; КС – Каберне-Совіньон



### Висновки

Сорти винограду Сіра, Санджовезе, Пті Вердо визрівають в умовах України і мають кондиції, що дозволяють їх переробляти на столові вина, а виноматеріали з них, виготовлені за різними технологічними схемами, мають фізико-хімічні показники, відповідні вимогам, що висуваються до столових сухих вин.

Технологічний запас фенольних сполук (мг/дм<sup>3</sup>), в т.ч. антоціанів, вказує на потенціал перспективних сортів винограду для отримання вин з високою біологічною цінністю.

Спосіб переробки винограду суттєво впливає на вміст біофлавоноїдів у виноматеріалах. Для забезпечення високого вмісту речовин фенольного комплексу рекомендовано переробляти виноград сортів Сіра, Санджовезе і Пті Вердо бродінням м'язги, на відміну від Каберне-Совіньйон, де високі значення фенольних сполук забезпечуються підброджуванням м'язги.

### Список літератури

- 1 **Валуїко, Г. Г.** Вино и здоровье / **Г. Г. Валуїко** // Симферополь: Ди Ай Пи. – 2007. – 170 с.
- 2 **Ялонецкий, А. Я.** Виноградное вино как функциональный продукт питания лечебно-профилактического назначения / **А. Я. Ялонецкий** // *Виноградарство и виноделие*. – 2010. – № 4 – С. 36-37.
- 3 **Агеева, Н. М.** Антимикробное и противовирусное действие красных вин. / **Н. М. Агеева, В. А. Маркосов, Р. В. Гублия** // *Виноделие и виноградарство*. – 2008. – № 5. – С. 21-22.
- 4 **Flanzy, C.** Le vin Rosé / **C. Flanzy, G. Masson, F. Millo** // *Éditions Féret*. – 2009. – 334 p.
- 5 **Ryan, J.** Anthocyanin composition of Cabernet Sauvignon and Tempranillo grapes at different stages of ripening / **J. Ryan, E. Revilla** // *Agric. Food Chem.* – 2003. – №51 (11). – С. 3372-3378. – doi: 10.1021/jf020849u.
- 6 **Puértolas, E.** Evolution of polyphenolic compounds in red wine from Cabernet Sauvignon grapes processed by pulsed electric fields during aging in bottle / **E. Puértolas, G. Saldaña, S. Condón, I. Álvarez, J. Raso** // *Food Chemistry*. – 2010. – № 119. – С.1063-1070. – doi: 10.1016/j.foodchem.2009.08.018.
- 7 **Gutierrez, I. H.** Phenolic composition and magnitude of copigmentation in young and shortly aged red wines made from the cultivars, Cabernet Sauvignon, Cencibel and Syrah / **I. Hermosin Gutierrez, E. Sanchez-Palomo Lorenzo, A. Vicario Espinosa** // *Food Chemistry*. – 2005. – № 92. – С. 269-283. – doi: 10.1016/j.foodchem.2004.07.023.
- 8 **Vinci, G.** Influence of environmental and technological parameters on phenolic composition in red wine / **G. Vinci, Sara Letizia Maria Eramo, I. Nicoletti, D. Restuccia** // *J. commodity sci. technol. quality*. – 2008. – № 47 (I-IV). – С. 245-266.
- 9 **Волынкин, В. А.** Биологическая ценность продукции из урожая новых сортов винограда сложной генетической структуры / **В. А. Волынкин, С. В. Левченко, Ю. А. Огай, Л. А. Соловьева** // *Одеса: Виноградарство і виноробство. Міжвідомчий тематичний науковий збірник*. – 2008. – № 45(2). – С. 18-23.
- 10 **Авидзба, А. М.** Биологическая активность продуктов переработки сортов винограда новой селекции / **А. М. Авидзба, Ю. А. Огай, В. А. Волынкин, С. В.**

- Левченко, Л. М. Соловьева, Л. И. Катрич, А. Л. Загайко, М. Ф. Агафонов** // *Виноделие и виноградарство*. – 2007. – № 6. – С. 26-28.
- 11 **Положишникова, М. А.** Определение биологической ценности и идентификация красных виноградных вин по содержанию флаванолов и фенил-карбоновых кислот / **М. А. Положишникова, О. Н. Перельгин** // *Виноделие и виноградарство*. – 2005. – № 6. – С. 22-24.
  - 12 **Волынкин, В. А.** Сорта винограда западноевропейской эколого – географической группы как достойное пополнение промышленного сортимента / **В. А. Волынкин, З. В. Котоловец, А. А. Полулях** // *Матер. дистанц. науч.-практ. конф. – 20 июня 2012 г. – Новочеркасск: ФГБНИИ ВНИИВВ им. Я.И. Потопенко*, 2012. – С. 29-32 с.
  - 13 **Котоловец, З. В.** Сира – перспективный для Украины технический сорт винограда / **З. В. Котоловец** // Режим доступа: <http://bo0k.net/index.php?bid=10489&chapter=1&p=achapter>.
  - 14 РД 0033483.042-2005. Методика оценки сортов винограда по физико-химическим и биохимическим показателям. – Ялта, ИВиВ "Магарач". – 2005. – 22 с.
  - 15 **Гержилова, В. Г.** Методы технохимического контроля в виноделии / **В. Г. Гержилова** // *Симферополь: Таврида*. – 2009. – 304 с.
  - 16 **Валуїко, Г. Г.** Теория и практика дегустации вин / **Г. Г. Валуїко, Е. П. Шольц-Куликов** // *Симферополь: Таврида*. – 2012. – 253 с.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Valujko, G. G.** Vино i zdorov'e [Wine and Health]. Simferopol': Di Aj Pi, 2007. 170 p.
- 2 **Jaloneckij, A. Ja.** Vinogradnoe vino kak funkcional'nyj produkt pitanija lecebno-profilaktičeskogo naznachenija [Grape wine as a functional therapeutic food product] *Vinogradarstvo i vinodelie*. 2010, 4, 36-37.
- 3 **Ageeva, N. M., Markosov V. A., Gublija R. V.** Antimikrobnoe i antivirusnoe dejstvie krasnyh vin. [The antimicrobial and antiviral action of red wines] *Vinodelie i vinogradarstvo*. 2008, 5, 21-22.
- 4 **Flanzy, C., Masson, G., Millo, F.** Le vin Rosé. *Éditions Féret*. 2009, 334 p.
- 5 **Ryan, J., Revilla, E.** Anthocyanin composition of Cabernet Sauvignon and Tempranillo grapes at different stages of ripening. *Agric. Food Chem.* 2003, 51 (11), 3372-3378, doi: 10.1021/jf020849u.
- 6 **Puértolas, E., Saldaña, G., Condón, S., Álvarez, I., Raso, J.** Evolution of polyphenolic compounds in red wine from Cabernet Sauvignon grapes processed by pulsed electric fields during aging in bottle. *Food Chemistry*. 2010, 119, 1063-1070, doi: 10.1016/j.foodchem.2009.08.018.
- 7 **Gutierrez, I. H., Lorenzo, E. S., Espinosa, A. V.** Phenolic composition and magnitude of copigmentation in young and shortly aged red wines made from the cultivars, Cabernet Sauvignon, Cencibel and Syrah / *Food Chemistry*. 2005, 92, 269-283, doi: 10.1016/j.foodchem.2004.07.023.
- 8 **Vinci, G., Eramo, Sara Letizia Maria Nicoletti, I., Restuccia, D.** Influence of environmental and technological parameters on phenolic composition in red wine. *J. commodity sci. technol. quality*. 2008, 47 (I-IV), 245-266.
- 9 **Volynkin, V. A. Levchenko, S. V. Ogaj, Ju. A., Solov'eva L. A.** Biologičeskaja cennost' produkcii iz urozhaja novykh sortov vinograda slozhnoj genetičeskoj struktury [The biological value of the product from the harvest of the new grapes varieties of a complex genetic structure]. *Odesa: V*

- 10 *inogradarstvo i vinorobstvo. Mizhvidomchij tematicnij naukovij zbirnik*, 2008, **45** (2), 18-23.
- 11 **Avidzba, A. M., Ogaj, Ju. A., Volynkin, V. A., Levchenko S. V., Solov'eva, L. M., Katrich, L. I., Zagajko, A. L., Agafonov, M. F.** Biologicheskaja aktivnost' produktov pererabotki sortov vinograda novej selekcii [The biological activity of the products of processing of grapes of new selection]. *Vinodelie i vinogradarstvo*, 2007, **6**, 26-28.
- 12 **Polozhishnikova, M. A., Pereygin, O. N.** Opredelenie biologicheskoy cennosti i identifikacija krasnyh vinogradnyh vin po sodержaniyu flavanolov i fenil-karbonovyh kislot [Determination of the biological value and identification of red wines on the content of flavonols, and phenyl-carboxylic acid]. *Vinodelie i vinogradarstvo*, 2005, **6**, 22-24.
- 13 **Volynkin, V. A., Kotolovec', Z. V., Poluljah A. A.** Sorta vinograda zapadnoevropejskoj jekologo – geograficheskoy gruppy kak dostojnoe popolnenie promyshlennogo sortimenta [Grapes varieties of Western European ecological and geographical group as a worthy completion of the industrial assortment]. *Mater. distanc. nauch.-prakt. konf. Novocherkassk: FGBNNII VNIIVV im. Ja.I. Potapenko*, 2012, pp. 29-32.
- 14 **Kotolovec', Z. V.** Sira – perspektivnyj dlja Ukrainy tehnikeskij sort vinograda [Syrah is a perspective for Ukraine technical variety of grapes]. [Web]: <http://bo0k.net/index.php?bid=10489&chapter=1&p=achapter>
- 15 RD 0033483.042-2005. Metodika ocenki sortov vinograda po fiziko-himicheskim i biohimicheskim pokazateljam [Methods of assessing the grapes on the physico-chemical and biochemical parameters]. *Jalta, IViV "Magarach"*, 2005. 22 p.
- 16 **Gerzhikova, V. G.**, ed. Metody tehnohimicheskogo kontrolja v vinodelii [Methods of technochemical control in winemaking]. *Simferopol', Tavrida*, 2009. 304 p.
- 17 **Valujko G. G., Sholts E. P.** Teorija i praktika degustacii vin [Theory and practice of wine tasting]. *Simferopol', Tavrida*, 2012, 253 p.

## Відомості про авторів (About authors)

**Цыганкова Елена Вікторівна** – аспірант, кафедра біотехнології продуктів бродіння і виноробства, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна; e-mail: [cygankova@ukr.net](mailto:cygankova@ukr.net).

**Tsygankova Elena Viktorovna** – Postgraduate Chair of Biotechnology of fermentation products and winemaking, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: [cygankova@ukr.net](mailto:cygankova@ukr.net).

**Білько Марина Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, кафедра біотехнології продуктів бродіння і виноробства, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна; e-mail: [aromat@ukr.net](mailto:aromat@ukr.net).

**Bil'ko Marina Vladimirovna** – Candidate of Technical Sciences, associate professor, Chair of Biotechnology of fermentation products and winemaking, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: [aromat@ukr.net](mailto:aromat@ukr.net).

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Цыганкова, О. В.** Дослідження впливу способу переробки винограду на фенольний комплекс столових вин / **О. В. Цыганкова, М. В. Білько** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 164-170. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.24.

Please cite this article as:

**Tsygankova, E. V., Bil'ko, M. V.** Investigation of the effect of grapes processing method on the phenolic complex of table wines // *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 174-170, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.24.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Цыганкова, Е. В.** Исследование влияния способа переработки винограда на фенольный комплекс столовых вин / **Е. В. Цыганкова, М. В. Білько** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 164-170. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.24.

**АННОТАЦІЯ** Представлены результаты исследований фенольного комплекса розовых и красных виноматериалов из винограда сортов Санджовезе, Сира, Пти Вердо, Каберне-Совиньон. Установлено, что способ переработки винограда существенно влияет на качественный и количественный состав фенольного комплекса. Высокая массовая концентрация биофлавоноидов была в схемах переработки винограда, которые предусматривали подбраживание и брожение мезги. Проведен сравнительный анализ органолептических, физико-химических и оптических показателей качества виноматериалов. Перспективные для Украины сорта винограда Санджовезе, Сира, Пти Вердо имеют хороший потенциал для получения вин с высокой биологической ценностью.

**Ключевые слова:** способы переработки винограда, виноматериалы, технологический запас фенольных веществ, флавоноиды, антоцианы, катехины.

Надійшла (received) 24.06.2016

## ЗМІСТ

### БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

- Авер'янова Л. А., Товстокора Л. В., Аврунін О. Г.* Можливості визначення КТ-параметрів кісткового мозку в плануванні радіонуклідної терапії кісткових метастазів 5
- Аврунін О. Г., Тимкович М. Ю., Бих А. І.* Побудова тривимірної моделі кровоносної системи головного мозку для задач планування і тренування проведення нейрохірургічних втручань 11
- Аврунін О. Г., Фарук Х. И., Кононенко Т. С.* Можливості визначення тиску у під масковому просторі при риноманометрії 17
- Безгінова О. М., Литвиненко С. В., Романов О. І., Хоменко Є. В.* Оцінка квантової ефективності реєстрації детекторів рентгенівського випромінювання цифрових мамографічних комплексів СІМА і МАДІС 23
- Бойко Д. О.* Оцінка якості візуалізації мамограм 29
- Глухенька Т. А., Кіпенський А. В., Король Е. І., Назаров Е. І.* Новий метод озонування фізіологічного розчину та його внутрішньовенної інфузії 36
- Колісник К. В., Шишкін М. А., Папірний К. М.* Особливості застосування модулів платформи ARDUINO в телемедицині 45
- Куліченко В. В., Томашевський Р. С., Макаров В. О.* Покращення енергетичних показників оптичного вимірювального каналу цифрового портативного спірометра 53
- Лебедєв О. В., Дубко А. Г., Яровая С. О.* Математичне моделювання контактного зварювання живих тканин спеціалізованими мікрохірургічними пінцетами 60
- Мещанінов С. К., Льдовська О. В.* Модель оцінки ризику відмови підсистеми «людина» 66
- Поворознюк А. І., Поворознюк О. А.* Інформаційна підтримка діагностично-лікувальних заходів в медицині 73
- Сокол Є. І., Бойко В. В., Щапов П. Ф., Замятін П. Н., Томашевський Р. С.* Інформаційний аналіз випадкових вимірювальних сигналів в динамічно активних біофізичних експериментах 80
- Сокол Є. І., Лапта С. С., Соловійова О. І.* Визначення внутрішніх діагностичних параметрів організму людини за непрямыми клінічними даними 87
- Ткачук Б. В.* Автоматизація контролю статусу гідратації пацієнта під час процедури гемодіалізу 93

### ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Коржик М. В.* Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мунштук 99
- Кучер С. О.* Контроль основних властивостей металу головного циркуляційного насосу атомної станції 107
- Литвиненко А. В., Юхименко М. П.* Математична модель гідродинаміки руху двофазного висхідного потоку в пневмокласифікаторах змінного перерізу 113
- Моргунов В. В., Диденко Н. В., Трищ Р. М.* Чисельний розрахунок ефективності радіаційної захисного одягу за допомогою методу Монте-Карло 119
- Хімічева Г. І., Куриляк В. В.* Аналіз поведінки параметрів інтелектуальних металів та полімерів в умовах високошвидкісного навантаження 125
- Цвид Т. А., Кузнецов Ю. М.* Аналітичне визначення внутрішніх напружень та переміщень тонкостінної втулки інструментального затискного патрона 132

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Михайлов В. І., Кучеренко Н. В., Барган О. Г.* Теоретичні проблеми застосування ІЧ та НВЧ радіометрії на прикладі супутникового проекту NASA – JAXA 138
- Погорелов А. В., Саваневич В. Є.* Оцінка екваторіальних координат об'єктів на цифровому кадрі для довгофокусних і короткофокусних телескопів 147

### ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

- Сімакова О. О., Коренець Ю. М., Глушко В. О.* Дослідження та вплив якості питної води на хлібопекарні властивості пшеничного борошна 158
- Циганкова О. В., Білько М. В.* Дослідження впливу способу переробки винограду на фенольний комплекс столових вин 164

## CONTENTS

## BIOMEDICAL ENGINEERING

|  |    |
|--|----|
| <i>Averyanova L., Tovstokora L., Avrunin O., Grushka G.</i> Possibilities of determination of bone marrow CT-parameters for bone metastases radionuclide therapy planning    | 5  |
| <i>Avrunin O., Tymkovych M., Bykh A.</i> Construction of Three-Dimensional Model of Circulatory System of the brain for Planning and Training of Neurosurgical Interventions | 11 |
| <i>Avrunin O., Faruk H., Kononenko T.</i> Possibilities of pressure determination in internal mask area at rhinomanometry  | 17 |
| <i>Bezginova O., Litvinenko S., Romanov O., Khomenko E.</i> Assessment of the quantum detection efficiency of X-ray detectors, digital mammography complexes MADIS and SIM   | 23 |
| <i>Boyko D. A.</i> Imaging quality assessment of mammograms  | 29 |
| <i>Glukhenka T., Kipenskyi A., Korol I., Nazarov E.</i> The new ozonization method of physiological solution and its intravenous infusion                                    | 36 |
| <i>Kolisnyk K., Shishkin M., Papirnyi K.</i> Features of application modules ARDUINO platforms in telemedicine   | 45 |
| <i>Kulichenko V., Tomashevskiy R., Makarov V.</i> Improving the energy characteristics of optical measurement channel of digital portable spirometer                         | 53 |
| <i>Lebedev A., Dubko A., Yarovaya S.</i> Mathematical modeling of the resistance welding of living tissues by the specialized microsurgical tweezers                         | 60 |
| <i>Meshaninov S. K., L'Dovskaia A. V.</i> Model assessment of risk of failure subsystem "man"  | 66 |
| <i>Povoroznyuk A., Povoroznyuk O.</i> Information support diagnostic-medical action in medicine  | 73 |
| <i>Sokol E., Boyko V., Shchapov P., Zamyatin P., Tomashevskiy R.</i> Information analysis of random measuring signals in dynamic biophysical experiments                     | 80 |
| <i>Sokol Y., Lapta S., Solovyova O.</i> Determination of internal diagnostic parameters of organism of man from indirect clinical data                                       | 87 |
| <i>Tkachuk B.</i> Automation control status hydration of patients during hemodialysis  | 93 |

## ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

|   |     |
|---|-----|
| <i>Karvatskii A., Lazarev T., Korzhyk M.</i> Numerical investigation of large size carbon products formation process using the extrusion method                         | 99  |
| <i>Kucher S.</i> Control the basic properties of the metal of the main circulation pump nuclear power station   | 107 |
| <i>Lytvynenko A. V., Yukhymenko M. P.</i> The mathematical model of hydrodynamics motion of two phase ascending flow in pneumatic classifiers of variable cross-section | 113 |
| <i>Morgunov V., Didenko N., Trishch R.</i> Numerical calculation of radiation protective clothing efficiency by using Monte Carlo method                                | 119 |
| <i>Himicheva A., Kurylyak V.</i> Analysis behaviour parametrs of intelligent metals and polymers under high speed loading   | 125 |
| <i>Tsyvd Taras, Kuznetsov Yuriy</i> Analytical determination of internal stress and displaced Thin-walled plug  | 132 |

## INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

|   |     |
|---|-----|
| <i>Mikhailov V., Kucherenko N., Bargan O.</i> Theoretical problems of application of infrared and microwave radiometry on the example of NASA– JAXA satellite project | 138 |
| <i>Pohorelov A. V., Savanevych V. E.</i> Assessment of objects equatorial coordinates on the digital frames for long-focus and short-focus telescopes                 | 147 |

## CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

|  |     |
|--|-----|
| <i>Simakova O., Korenets Yu., Glushko V.</i> Research and effect of drinking water on bread-making properties of wheat flour         | 158 |
| <i>Tsygankova E. V., Bil'ko M. V.</i> Investigation of the effect of grapes processing method on the phenolic complex of table wines | 164 |

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Збірник наукових праць  
Серія:  
Нові рішення в сучасних технологіях  
№ 25 (1197) 2016

Науковий редактор чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Є. І. Сокол  
Технічний редактор канд. техн. наук А. В. Грабовський

Відповідальний за випуск: канд. техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».  
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmi@gmail.com

Обл.-вид. №

Підп. до друку «22» серпня 2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,0. Облік.вид.арк. 10,0.  
Тираж 300 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК №3657 від 24.12.2009  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---