

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

ВІСНИК

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

Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях"

№ 39 (1148) 2015

Збірник наукових праць

Видання засновано в 1961 р.

Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. –
Х.: НТУ «ХПІ» – 2015р. - №39 (1148) – 121 с.

Державне видання

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

Збірник виходить українською та російською 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 постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).

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. Грабчснко, 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.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях» включений у довідник періодичних видань бази даних «**Ulrich's Periodicals Directory**» (New Jersey, USA)

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»
Протокол № 7 від «07» липня 2015 р.

©Національний технічний університет «ХПІ», 2015

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**УДК 621.785.5: 621.9.048.7****УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ЛАЗЕРНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ****О. В. АКИМОВ*, АЛАА ФАДИЛ АДАН***Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА***email: litvo11@kpi.kharkov.ua*

АННОТАЦИЯ Розробка нових ресурсозберігаючих, екологічно чистих технологій поверхневого легування є важливим завданням сьогодення. Метою даної роботи є вивчення й аналіз даних по лазерному легуванню, що дозволить в подальшому вирішити проблему значної тривалості хіміко-термічної обробки і прискорити процеси насичення легуючими елементами завдяки новим видам поверхневих обробок. Показано, що лазерне легування дозволяє відійти від необхідності нагріву деталей до високих температур і тривалої витримки при цих температурах, а, отже, і істотно знизити енерговитрати і не зменшувати матрицю деталі.

Ключові слова: поверхнєве лазерне легування, хіміко-термічна обробка, зміцнення деталі

АННОТАЦИЯ Разработка новых ресурсосберегающих, экологически чистых технологий поверхностного легирования является важной задачей на сегодняшний день. Целью данной работы является изучение и анализ данных по лазерному легированию, что позволит в дальнейшем решить проблему значительной длительности химико-термической обработки и ускорить процессы насыщения легирующими элементами благодаря новым видам поверхностных обработок. Показано, что лазерное легирование позволяет отойти от необходимости нагрева деталей до высоких температур и длительной выдержки при этих температурах, а, следовательно, и существенно снизить энергозатраты и не разупрочняют матрицу детали.

Ключевые слова: поверхностное лазерное легирование, химико-термическая обработка, упрочнение детали

IMPROVEMENT OF PERFORMANCE PROPERTIES OF PARTS BY LASER SURFACE ALLOYING**О. АКИМОВ*, АЛАА ФАДИЛ ИДАН***National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, UKRAINE*

ABSTRACT Development of new resource-saving, environmentally friendly technologies of surface alloying is an important task of our time. The aim of this work is the study and analysis of data on laser alloying, which will continue to solve the main problem of chemical heat treatment and accelerate the processes of saturation of the alloying elements by creating new kinds of surface treatments. It is shown that laser alloying allows to depart from the required heating of the parts to a high temperature and long exposure at these temperatures, and, consequently, significantly reduce energy costs and prevent weakening of the matrix details. After analyzing the issues examined laser alloying, it is possible to draw the following conclusions: 1. Laser alloying increases the diversity of possible structures of the diffusion layers in comparison with traditional methods of chemical-thermal treatment. Phase composition of the layer can be controlled by adjusting the three main process parameters: the value of energoimpuls laser radiation, the amount of alloying of the coating and the degree of revocationdate laser beam. 2. Laser alloying leads to a significant hardening of the modified layer, wherein the hardness of the doping zones is determined mainly by the hardness of themselves chemical compounds. In the laser processing of the surface is observed the increase of wear resistance of steels. 3. The brittleness of high-strength zones laser alloying can be reduced through the development of various combined methods of surface hardening of parts. 4. Laser alloying of the coatings allows adjustment of the phase composition of the hardened layer and the transition zone, microhardness and its distribution by varying the composition of the saturating mixture. 5. In combined treatment, including laser and chemical-thermal treatment, as well as in multicomponent alloying of the coatings are formed of modified layers having corrosion resistance in most acids.

Keywords: surface laser alloying, chemical heat treatment, hardening details

Введение

В настоящее время актуальным является вопрос применения ресурсосберегающих технологий для повышения эксплуатационного срока службы нагруженных стальных деталей. Предъявляемые

высокие требования к качеству рабочего слоя с одновременным использованием более дешевой матрицы, дали толчок для развития новых экономически целесообразных технологий поверхностного упрочнения, одной из которых является поверхностное легирование, достигаемое

различными методами.

Легирование (от лат. ligo – связываю, соединяю) – введение добавок (металлов, неметаллов и их соединений) в металлы и сплавы для придания им определенных физических, химических, механических свойств [1].

При легировании металлов и сплавов могут образовываться твердые растворы, смеси двух и более фаз, интерметаллиды, карбиды, нитриды, оксиды, бориды и другие соединения легирующих элементов с основой сплава или между собой [1, 2].

В результате легирования существенно меняются физико-химические характеристики исходного металла или сплава. Легирующие элементы влияют на температуру плавления, характер дефектов кристаллической решетки, на формирование зерен и тонкой кристаллической структуры, область существования аллотропических модификаций и кинетику фазовых превращений, на дислокационную структуру, жаростойкость и коррозионную стойкость, электрические, магнитные, механические, диффузные и многие другие свойства сплавов [2].

Разработка новых ресурсосберегающих, экологически чистых технологий поверхностного легирования является важной и актуальной задачей.

Цель работы

Целью данной работы является изучение и анализ данных по лазерному легированию, что позволит в дальнейшем решить проблему значительной длительности химико-термической обработки и ускорить процессы насыщения легирующими элементами благодаря новым видам поверхностных обработок.

Изложение основного материала

Легирование подразделяют на объемное и поверхностное [1, 2]. При объемном легировании легирующий элемент в среднем статистически распределяется в объеме металла. В результате поверхностного легирования легирующий элемент концентрируется на поверхности металла. Комплексное легирование представляет собой насыщение сразу несколькими элементами, определенное содержание и соотношение которых позволяет получить необходимый комплекс свойств.

В основе большинства традиционных процессов поверхностного легирования сталей (в сочетании с термической обработкой) лежит диффузное насыщение элементами из газовой или жидкой фазы и химическое осаждение из газовой фазы – химико-термическая обработка (ХТО), в результате которой происходит изменение химического состава и микроструктуры материала поверхности (рис. 1) [3].

Наиболее распространенными такими процессами насыщения неметаллическими

элементами являются: цементация (легирующий элемент углерод), азотирование (легирующий элемент азот), борирование (легирующий элемент бор) и т. д.

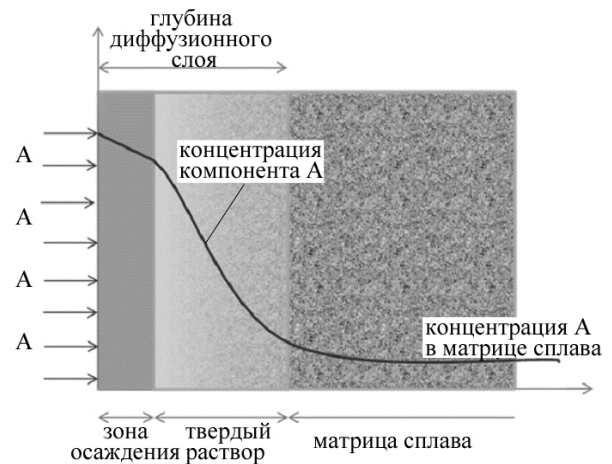


Рис. 1 – Принципы химико-термической обработки, показывающие распределение химического элемента внутри сплава наряду с типично модифицированными поверхностными областями

Однако перечисленные методы ХТО имеют ряд общих существенных недостатков как по технологии процесса, так и по свойствам легированного слоя. К числу основных недостатков, ограничивающих применение этих способов как методов обработки, упрочняющих поверхность, можно выделить [4]:

- значительную длительность процессов (например, скорость насыщения углеродом порядка $2,8 \cdot 10^{-5}$ мм/с, а для получения азотированного слоя толщиной 0,5 мм в конструкционных сталях при температурах 500–520 °С длительность составляет 50–70 ч), следствием чего является малая производительность процесса и существенное разупрочнение сердцевины детали;

- деформацию и коробление под действием напряжений, создаваемых условиями нагрева во время технологического процесса и последующего охлаждения и, как следствие, необходимость в дополнительных операциях механической обработки;

- хрупкость и отшелушивание внешней части обработанного слоя, в связи с резким перепадом твердости между упрочненным слоем и матрицей.

Также недостатками перечисленных выше методов ХТО является небольшая толщина легированного слоя и плохая его связь со структурной базой металла. При форсированных режимах эксплуатации легированный слой быстро срывается с поверхности детали.

В связи с растущими эксплуатационными требованиями к тяжело нагруженным деталям различных узлов и механизмов актуальными являются задачи повышения жаростойкости и трещиностойкости. Однако обычная ХТО с закалкой

и отпуском хотя и влияет на свойства изделия, во многих случаях явно недостаточна. Она в наибольшей степени подходит для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и в меньшей степени для повышения жаростойкости, а также сопротивления возникновению и распространению трещин [1, 2].

С целью улучшения поверхностных свойств изделий проводят **лазерное поверхностное легирование**. Его осуществляют путем введения в заданные участки поверхности различных компонентов, которые, смешиваясь с материалом основы, образуют сплавы или композиции требуемого состава. При этом обязательным условием является сохранение в обработанных лазером участках поверхности значительного материала основы. Таким образом, принципиальное отличие легирования от закалки состоит в изменении химического состава поверхностного слоя материала. Схематическое изображение поперечного сечения стального образца после лазерного легирования представлено на рис. 2 [5].

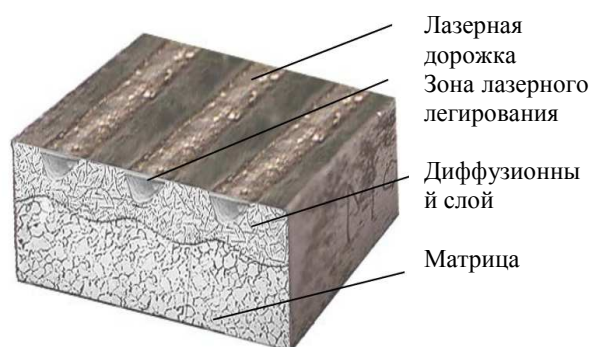


Рис. 2 – Формирование модифицированного слоя на стальной поверхности

Преимущества лазерного поверхностного легирования заключается в следующем [4]:

1. Хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя.
2. Большая скорость процесса и достижение высокого качества поверхностного слоя.
3. Возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом.
4. Экономия дорогостоящего легирующего материала.
5. Отсутствие необходимости в последующей термообработке.
6. Экологическая чистота процесса легирования.

Без расплавления поверхности обеспечить достижение диффузионного насыщения легирующими элементами на большую глубину практически невозможно. Это связано с кратковременностью лазерного термического воздействия. Теоретический анализ диффузионных процессов в твердой фазе при нагреве лазерным

излучением показал, что глубина проникновения растворенного компонента наибольшая, примерно 1 мкм при длительности импульса 4 мс.

В процессе лазерного оплавления (рис. 3) поверхностей металлов и сплавов вследствие больших градиентов температуры возникают интенсивные гидродинамические потоки [3, 4]. При этом процессы массопереноса по всей зоне оплавления ускоряются, что позволяет на практике осуществлять лазерное легирование.

Образование легированных зон сопровождается по крайней мере тремя процессами, приводящими к перемешиванию легирующих добавок с расплавом матрицы, массопереносом на расстояния в несколько сот микрометров в результате конвекционного перемешивания, массопереносом на расстояния в несколько микрометров вследствие диффузии в жидкой и твердой фазах и массопереносом в результате действия термокапиллярных сил.

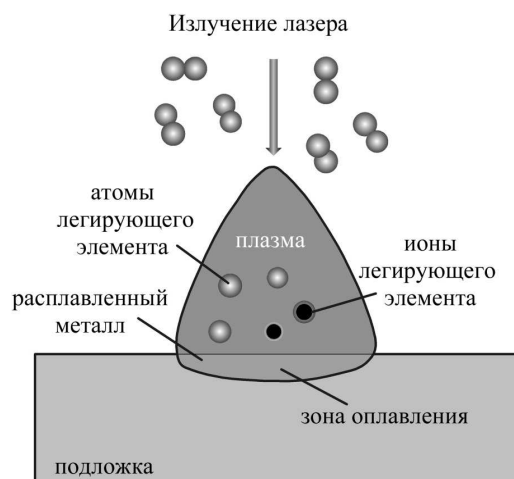


Рис. 3 – Схематическое изображение лазерного легирования с оплавлением

Зоны лазерного легирования имеют строение, аналогичное строению зоны после лазерной закалки с оплавлением. Отличие состоит в том, что в металл расплавленной ванны вводят легирующие элементы. Диффузия элементов из зоны оплавления в зону термического влияния обычно происходит на расстояния не более 10 мкм. Однако в некоторых случаях экспериментально обнаружено перераспределение легирующих элементов в твердой фазе под зоной оплавления на глубине 200-300 мкм. Это может быть вызвано образованием тонких каналов жидкой фазы по границам зерен и блоков в твердом металле и массопереносом по этим каналам. Процессы массопереноса в твердой фазе также могут быть обусловлены дислокационным перемещением атомов в результате быстрых локальных деформаций.

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий состоит в

отсутствии слоистости. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легирующей зоне по глубине перемешаны примерно равномерно.

Характер проведения процессов получения поверхностных покрытий во многом зависит не только от вида и формы присадочного материала, но и от способа введения его в зону лазерной обработки. Кусковой присадочный материал – фольга, проволока, прутки – легко наносятся на поверхность подложки, большая часть энергии излучения при этом теряется на отражение. Использование порошкового присадочного материала позволяет несколько уменьшить отражение, однако в этом случае возникают проблемы закрепления порошка на поверхности и повышения коэффициента его использования. Подачу присадочных материалов при легировании наиболее просто осуществлять из газовой или жидкой фазы.

Различают предварительное нанесение легирующих компонентов на поверхность деталей или образцов в виде фольги, проволоки прутков, порошковых смесей и т.д., а также подачу этих компонентов в зону лазерного оплавления одновременно с воздействием излучения. Предварительное нанесение можно осуществлять газотермическим напылением, гальваническим и химическим осаждением, накаткой, диффузионным методом, нанесением паст, насыпкой и др. Во время лазерного воздействия компоненты подают только при обработке непрерывными лазерами, так как при импульсном воздействии необходимы сложные устройства, синхронизирующие подачу присадки к воздействию импульса. Ее осуществляют с помощью газовой, порошковой или жидкой струи, под действием силы тяжести порошков, при механической подаче ленты или проволоки и т.д.

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий заключается в отсутствии слоистости. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности, перехода от фаз с большей концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легирующей зоне по глубине перемешаны примерно равномерно [4–6].

Исходя из целей лазерного легирования (повышение износостойкости, коррозионной стойкости, контактной выносливости и других служебных характеристик), необходимо учитывать известные результаты работ по ХТО. Вместе с тем нельзя сразу сопоставлять процессы формирования легированного поверхностного слоя при оплавлении лазером с процессами ХТО, при которых легирование идет как диффузия в твердой фазе. При лазерном легировании в результате «жесткого» термического

цикла с большими скоростями нагрева и охлаждения характерно образование перенасыщенных метастабильных структур высокой дисперсности, что недостижимо при обычной ХТО.

Размеры легированной зоны зависят в основном от энергетических параметров излучения и толщины покрытия из легирующего материала. Как правило, легирование импульсным излучением обеспечивает меньшие размеры легированной зоны, чем при обработке непрерывным излучением. В частности, если при импульсной обработке глубина зоны достигает 0,3–0,7 мм, то применение непрерывного излучения мощных лазеров позволяет увеличить глубину зоны до 3 мм [4–10].

Лазерное легирование неметаллическими компонентами – углеродом, азотом и бором – наибольшее распространение получили при использовании способа с нанесением на поверхность обмазок или паст и последующим оплавлением поверхности импульсным или непрерывным лазером. В этом случае технологические режимы лазерного легирования определяются параметрами лазерной обработки и толщиной слоя пасты. С повышением мощности излучения или энергии импульса размеры легированных зон возрастают, а концентрация легирующих элементов в них снижается. С увеличением толщины слоя пасты размеры легированных зон уменьшаются, а концентрация легирующего элемента повышается. Для каждой толщины слоя имеются критические режимы, при которых энергия лазерного излучения расходуется только на нагрев поверхности до температуры плавления, легирование в этом случае не происходит. При лазерном легировании с перекрытием зон обработки микротвердость в зонах повторного нагрева снижается значительно меньше, чем при термоупрочнении.

Технологической особенностью лазерного легирования с оплавлением обмазок является то, что при этом не требуется нанесение поглощающих покрытий, поскольку обмазки, как правило, обеспечивают поглощение энергии лазерного излучения на уровне 60 % и более. Лучшие результаты были получены при лазерном легировании не полированной, а шероховатой поверхности, так как это позволило обеспечить лучшую адгезию обмазки в более полный переход легирующего компонента в расплав вследствие быстрого подплавления вершин микронеровностей.

Средняя глубина образующихся легированных объемов при импульсной обработке в большинстве случаев составляет 0,3–0,4 мм, а при непрерывной – 0,3–1,0 мм. Необходимо учитывать, что, так как после легирования, как правило, высота наплавов равна 20–100 мкм, при последующей обработке поверхности значительная часть поверхностного слоя должна быть сошлифована [4–10].

Современные методы лазерного легирования

Лазерное легирование решает основную проблему химико-термической обработки – необходимость нагрева деталей до высоких температур и длительная выдержка при этих температурах, а, следовательно, и высокие энергозатраты и разупрочнение матрицы детали. Также для ускорения процессов насыщения легирующими элементами во время химико-термической обработки, проводят предварительную пластическую деформацию или лазерную обработку поверхности (изменение поверхностной структуры и создание внутренних напряжений). Наличие деформированной структуры в поверхностном слое значительно ускоряет диффузионные процессы, способствующие формированию упрочненного поверхностного слоя.

В другом случае лазерный нагрев существенно ускоряет диффузионные процессы, так как производится в режиме локального оплавления. Однако формирование легированных зон на поверхности происходит дискретно, как при импульсном, так и при непрерывном режимах обработки. Получение более однородных легированных слоев происходит путем последующего диффузионного отжига лазерно-легируемых изделий. При этом снижается суммарная длительность процесса для достижения заданной концентрации элемента в поверхностном слое.

Решению этой проблемы посвящены следующие работы UA19551, UA25412, UA98452, RU2415964, RU2527511.

Основными недостатками известных методов лазерного легирования являются:

- недостаточный уровень проникновения легирующих элементов в поверхностный слой материала за счет существенного теплового сопротивления на границе «поверхностный слой – матрица» в результате слабого теплового контакта, который обусловлен наличием связующих соединений в обложке, а также нежелательное легирование материала химическими соединениями, содержащиеся в связующих веществах;

- использование опасных химических соединений, таких как ацетилен и ацетон, что усложняет работу, необходимость дополнительного технического оборудования для подачи жидкости в зону лазерного действия, а также сложность контроля химической реакции во время обработки.

В работе UA26467 решается задача разработки способа лазерного легирования сплавов на основе железа, который путем повышения концентрации углерода в γ -твердом растворе сплавов и улучшения стойкости контакта «углерод-матрица», позволяет повысить механические свойства поверхности сплавов, а именно твердости, износостойкости и др.

Также актуальным является и подбор качественной обложки (UA45796, UA50172, UA62427,

UA62980), которая позволила бы увеличить количество легирующих веществ, способных проникать через барьер поверхностного слоя, образующих химические соединения, такие как карбиды, нитриды, бориды и т.д., повышающие эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Решению этой же проблеме посвящены и зарубежные патенты CN103114292, US5985056, US6229111.

Анализ литературных данных позволил выявить некоторые общие закономерности формирования поверхностных слоев при лазерном легировании:

1. Образующийся упрочненный слой состоит из двух зон. Первая (легируемая) зона в процессе обработки находится в расплавленном состоянии, в нее вводится насыщающее вещество. Вторая зона остается при лазерном воздействии твердой, но нагревается (зона термического влияния). Зона термического влияния располагается вокруг зоны легирования (ее можно наблюдать только в материалах, имеющих фазовые превращения при нагреве в твердом состоянии). Максимальную твердость зоны термического влияния должна иметь после лазерного легирования, в процессе которого в ней происходит мартенситное превращение.

2. На формирование легируемой зоны оказывают влияние три технологических параметра обработки: толщина наносимой пасты, скорость перемещения обрабатываемой поверхности и плотность мощности лазерного излучения. Значительную трудность представляет сравнение и воспроизведение основного параметра лазерной обработки – плотности мощности (Вт/см²) или мощность (Вт).

3. Структура легируемой зоны зависит от количества легирующего вещества, приходящегося на единицу объема расплавленного металла. Увеличение скорости перемещения и уменьшение плотности мощности излучения приводит к повышению содержания легирующего вещества в зоне легирования, так как одно и то же количество легирующего вещества растворяется в меньшем расплавленном объеме. Увеличение слоя пасты до определенного предела также приводит к повышению концентрации легирующего элемента в легируемой зоне.

Выводы

Проанализировав рассмотренные вопросы лазерного легирования, можно сделать следующие выводы:

1. Лазерное легирование увеличивает многообразие возможных структур диффузионных слоев по сравнению с традиционными способами химико-термической обработки. Фазовым составом слоя можно управлять путем регулирования трех основных параметров обработки: значением энергии импульса лазерного излучения, количеством

наносимой легирующей обмазки и степенью расфокусированности лазерного луча.

2. Лазерное легирование приводит к существенному упрочнению модифицированного слоя, при этом твердость зон легирования определяется, главным образом, твердостью самих химических соединений. При лазерной обработке поверхности наблюдается повышение износостойкости сталей.

3. Хрупкость высокопрочных зон лазерного легирования можно уменьшить путем разработки различных комбинированных методов упрочнения поверхности деталей.

4. Лазерное легирование из обмазок позволяет регулировать фазовый состав упрочненного слоя и переходной зоны, микротвердость и ее распределение путем варьирования состава насыщающей смеси.

5. При комбинированной обработке, включающей лазерную и химико-термическую обработки, а также при многокомпонентном легировании из обмазок формируются модифицированные слои, обладающие коррозионной стойкостью в ряде кислот.

Список литературы

1. Гуляев, А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – 6-е изд. – М.: Металлургия. – 1986. – 544 с.
2. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // *Сварочное производство*. – 2013. – № 12. – С. 3-10.
3. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals / F. Czerwinski. – 2012. – P. 73-112 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5772/51566>
4. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – 664 с.
5. Chudina, O. Modification of Steel Surface Using the Laser Energy / O. Chudina // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. – 2014. – № 4. – P. 181-188. Published Online July 2014 in *SciRes*. [Web]: <http://dx.doi.org/10.4236/jseamat.2014.44021>
6. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка та С. О. Лук'яненко. – Київ: Вістка. – 2009. – 296 с

7. Kannatey-Asibu, Jr. E. Principles of laser materials processing / E. Kannatey-Asibu Jr. – Wiley, 2009. – 838 p.
8. Qui, F. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density / F. Qiu, V. Kujanpää // *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – Vol. 17, No.3. – P. 318-323.
9. Goia, F. Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / F. Goia, M. de Lima // *Journal of ASTM International*. – 2011. – Vol. 8, No.2. – P. 315-318.
10. Чудина, О. В. Поверхностное легирование углеродистых сталей при лазерном нагреве / О. В. Чудина, А. А. Брежнев // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2010. – № 4. – С. 10-16.

Bibliography (transliterated)

1. Gulyaev, A. P. *Metallography*. 6th ed. – Moscow: Metallurgy. – 1986. – 544 s.
2. Bernacki, A. V. Laser surface alloying of steel products (Review). *Welding production*. – 2013. – № 12. – S. 3-10.
3. Czerwinski, F. Thermochemical Treatment of Metals. – 2012. – P. 73-112 [Web]: <http://dx.doi.org/10.5772/51566>
4. Grigor'yants, A. G., Shiganov, I. N., Misurov, A. I. Technological processes of laser processing: proc. manual for schools / Moscow: MGTU im. N. E. Bauman ed. – 2006. – 664 p.
5. Chudina, O. Modification of Steel Surface Using the Laser Energy. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. – 2014. – № 4. – P. 181-188. Published Online July 2014 in *SciRes*. [Web]: <http://dx.doi.org/10.4236/jseamat.2014.44021>
6. Laser technology and computer modeling / Ed. by L. F. Head and S. A. Lukyanenko. / Kyiv: Vistka. – 2009. – 296 s.
7. Kannatey-Asibu, Jr., E. Principles of laser materials processing. Wiley. – 2009. – 838 p.
8. Qui, F., Kujanpää, V. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density. *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – № 17(3). – P. 318-323.
9. Goia, F., M. de Lima Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / *Journal of ASTM International*. – 2011. – № 8(2). – P. 315-318.
10. Chudina, O. V., Brezhnev, A. A. Surface alloying of carbon steels in laser heating. *Hardening technologies and coatings*. – 2010. – № 4. – P. 10-16.

Поступила (received) 29.05.2015

УДК 539.3

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБАНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ ЕЕ ОСЕВОМ И ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИЯХ

Е. Н. АНДРУСЕНКО

Кафедра высшей математики, Национальный транспортный университет, Киев, УКРАИНА
email: a.andrusenko@gmail.com

АННОТАЦИЯ Використовуючи теорію гнучких криволінійних стержнів, поставлено задачу про пружне згинання бурильних колон у каналах глибоких похило-скерованих свердловин з геометричними недосконаlostями їх осевих ліній у формі локалізованих гармонік. Чисельними методами виконаний аналіз залежності сил опору при спуску колони від параметра відношення лінійних швидкостей осевого і обертального руху. Проаналізовано результати комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: бурильна колона, криволінійна свердловина, геометричні недосконаlostі, сили опору, порожнина свердловини

АННОТАЦИЯ Используя теорию гибких криволинейных стержней, поставлена задача об упругом изгибании бурильных колонн в каналах глубоких наклонно-направленных скважин с геометрическими несовершенствами их осевых линий в форме локализованных гармоник. Численными методами выполнен анализ зависимости сил сопротивления при спуске колонны от параметра отношения линейных скоростей осевого и вращательного движения. Проанализированы результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: бурильная колонна, криволинейная скважина, геометрические несовершенства, силы сопротивления, полость скважины.

COMPUTER SIMULATION OF BENDING OF THE DRILL STRING DURING ITS AXIAL AND ROTARY MOTIONS

E. ANDRUSENKO

Department of high mathematics, National Transport University, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT The problem of computer simulation of deep curvilinear drilling operations is considered. The system of non-linear differential equations is derived on the basis of the theory of curvilinear flexible elastic rods. It permits one to describe quasi-static effects of the drill string bending accompanying the processes of its raising, lowering and rotation inside deep curvilinear bore-holes. The techniques for numerical solution of the constructed equations are elaborated. With their use the phenomena of the drill string movement accompanied by emergency situations are considered. The bore-hole axis line distortions in the shape of localized harmonics of the bore-hole axis line are considered for different lengths and depths of the wells. The improved mathematical model of non-linear elastic deforming of drill strings in the channels of curvilinear bore-holes is created. On the basis of usage of a specially chosen movable reference frame, the simplified constitutive equations are elaborated. They differ by absence of singularities connected with transformation of the radii of curvature and twist into infinity. The computer analysis of influence of the bore-hole axis line geometry imperfections on the forces resisting to drill string motion during performing lifting-lowering operations is performed. The questions of the forces minimization through the choice of optimal ratio between the velocities of axial and rotary motions are considered. Computer analysis of influence of the bore-hole axis line harmonic imperfections on the resistance forces impeding the drill string motion (the friction forces) is performed for the lowering operation.

Keywords: drill string, curvilinear bore-hole, geometric imperfections, resistance forces, bore-hole cavity.

Введение

Современное состояние техники и технологии бурения позволяет проходить нефтяные и газовые скважины различного назначения с различными конфигурациями и ориентациями стволов. Поскольку путем предоставления скважине заданного искривление можно существенно увеличить ее дебит и полноту отбора топлива, то в настоящее время бурение скважин сложной конфигурации становится основным в большинстве стран мира.

Успешность операции бурения в первую очередь зависит от конструкции бурильной колонны (БК) и режима бурения. Поэтому при проектировании криволинейных скважин большое внимание должно отводиться вопросам их компьютерного моделирования. Колонна бурильных труб представляет собой сложную пространственную систему с распределёнными параметрами. В зависимости от действующих на неё осевой силы и крутящего момента и условий контактного взаимодействия со стенкой скважины в ней могут локально протекать механические явления, типичные

для упругих стержней. Они могут терять устойчивость и выпучивать, принимать форму цилиндрической спирали [1, 2], совершать изгибные, крутильные и продольные колебания [3, 4]. Если БК расположена в полости криволинейной скважины, то она дополнительно подвергается воздействию контактных и фрикционных сил, а также сил инерции промысловой жидкости, которая циркулирует внутри и снаружи БК под действием избыточного давления, создаваемого гидронасосами [5 – 7]. Эти силы нелинейно зависят от кривизны осевой линии скважины и быстро возрастают с её увеличением. С этой точки зрения наиболее опасными являются локальные геометрические несовершенства осевой линии скважины, которые могут иметь формы синусоидальных [8] и спиральных [8] возмущений, а также сглаженных изломов [9, 10]. Как показано в отмеченных статьях на примерах скважин с боковым отклонением, равным 8000м, даже малые локализованные несовершенства могут привести к значительному увеличению сил сопротивления перемещению колонны и сделать невыполнимыми основные технологические операции бурения.

Цель работы

Целью данной работы является изучение процессов формирования сил сопротивления в режимах выполнения операций спуска БК в скважинах с боковым отклонением до 12000м, исследуется влияние локальных гармонических несовершенств в зависимости от мест их расположения, а также влияние параметра отношения линейных скоростей осевого и вращательного движений БК.

Методика компьютерного моделирования

Напряжённно-деформированное состояние колонны описывается уравнениями [8]

$$\frac{d\tilde{\mathbf{F}}}{ds} = -\mathbf{\Omega} \times \mathbf{F} - \mathbf{f}, \quad \frac{d\tilde{\mathbf{M}}}{ds} = -\mathbf{\Omega} - \mathbf{\tau} \times \mathbf{F} - \mathbf{m}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{F} – вектор внутренних сил в трубе бурильной колонны, \mathbf{M} – вектор внутренних моментов, $\mathbf{\Omega}$ – вектор Дарбу, s – натуральный параметр.

Используемые в уравнениях (1) векторы внешних распределённых сил \mathbf{f} и моментов \mathbf{m} подсчитываются по формулам

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^{gr} + \mathbf{f}^c + \mathbf{f}^{fr}, \quad \mathbf{m} = \mathbf{m}^{fr} = m_t^{fr} \mathbf{\tau}, \quad (2)$$

где \mathbf{f}^{gr} , \mathbf{f}^c , \mathbf{f}^{fr} – векторы распределённых сил тяжести, контактных сил и сил трения; \mathbf{m}^{fr} – распределённый крутящий момент сил трения.

Вектор Дарбу подсчитывается через кривизну k_R и кручение k_T по формуле

$$\mathbf{\Omega} = k_R \mathbf{b} + k_T \mathbf{\tau}. \quad (3)$$

Он определяется как вектор угловой скорости трёхгранника Френе \mathbf{n} , \mathbf{b} , $\mathbf{\tau}$ при движении его начала вдоль осевой линии скважины с единичной линейной скоростью.

На основе соотношений (1) – (3) построены дифференциальные уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dF_w}{ds} &= k_R F_n \pm \mu f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + \omega^2 r^2}} - f_t^{gr}, \\ \frac{dM_w}{ds} &= \mp \mu f^c \frac{\omega r}{\sqrt{\dot{w}^2 + \omega^2 r^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

определяющие функции внутренней осевой силы $F_w(s)$ и крутящего момента $M_w(s)$ на всей длине колонны $0 \leq s \leq S$, также силы контактного и фрикционного взаимодействия колонны и стенки скважины. Значения этих функций при $s=0$ характеризуют силу и момент, которые нужно приложить к верхнему концу колонны, чтобы выполнять заданную технологическую операцию (спуск, подъём, бурение). Каждая из них определяется выбором знаков “ \pm ” при соответствующих слагаемых в правых частях уравнений (4) и граничных условий на нижнем конце колонны.

Из системы (4) вытекает, что функции $F_w(s)$ и $M_w(s)$ существенно зависят от скоростей осевого движения \dot{w} колонны и угловой скорости её вращения ω . Поэтому выбором значений скоростей можно управлять этими функциями и подбирать их такие значения, которые уменьшают силы трения и сопротивления и минимизирует энергозатраты на выполнение рассматриваемой технологической операции.

Для уравнений системы (4) начальные условия известны. При выполнении операций спуска они имеют вид уравнений свободного края

$$F_w(0) = 0, \quad M_w(0) = 0. \quad (5)$$

Условия (5), позволяют сформулировать задачу Коши для системы (4), которую мы решаем методом Рунге-Кутты.

Рассмотрим моделирование геометрических несовершенств.

Пусть, например, траектория скважины с геометрическими несовершенствами задана в трёхмерном пространстве $Oxyz$ векторным уравнением

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(s). \quad (6)$$

Тогда методами дифференциальной геометрии можно подсчитать кривизну k_R и кручение k_T и использовать систему для выбора оптимального режима проходки.

В качестве примера рассмотрим случай, когда проектная геометрия скважины имеет очертание гиперболы уравнением

$$\begin{aligned} x &= \frac{L(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cos \vartheta, \\ y &= 0, \\ z &= \frac{H}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \sin \vartheta. \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь H – глубина скважины, L – удаление по горизонтали её нижнего конца.

На рис. 1 показаны геометрические схемы гиперболической осевой линии скважины (а) – без несовершенств; (б) с локализованными гармоническими несовершенствами.

В нижней части скважины образовано геометрическое несовершенство в форме локализованной гармоники с возмущением

$$h(s) = h_c e^{-\alpha^2 \left(\frac{s-s_c}{S} \right)^2}, \tag{8}$$

где h_c – наибольшее значение радиуса h ; α – коэффициент при показателе экспоненты (функции Гаусса), определяющий скорость убывания $h(s)$; s_c – значение параметра s с максимальным значением $h(s) = h_c$.

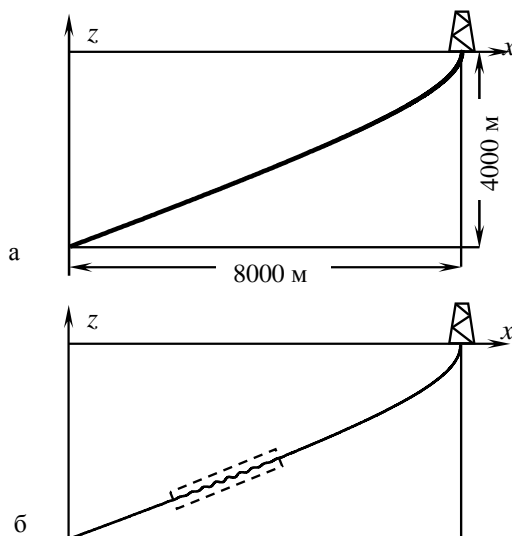


Рис.1 – Геометрические схемы гиперболической осевой линии скважины

Требуется подобрать такой режим извлечения стальной колонны из скважины, чтобы избежать её прихвата затраты энергии на операцию спуска были минимальны.

Результаты численных исследований

Интересно, что выбором различных значений величины $\nu = \dot{\omega} / (\omega d / 2)$ (отношения линейных скоростей осевого и вращательного движений элемента внешней поверхности трубы бурильной колонны) можно регулировать величину осевой силы F_w и крутящего момента M_w . Поэтому представляет интерес вопрос анализа осевого движения бурильной колонны в канале скважины и выбора значений ν , которые минимизируют эти величины. В связи с этим, для случая $h_c = 5$ м, с шагом $\lambda = 96,88$ м и локализованных несовершенств с центром в точке $s_c = S/8 = 1211$ м были проведены расчеты для операции спуска бурильной колонны при значениях $\nu = 100, 10, 5, 1, 0,1, 0$. В обобщенной форме эти результаты приведены в табл. 1.

Отметим, что с уменьшением значения ν становятся большими продольная сила F_w и крутящий момент M_w в точке подвеса $s = S$ бурильной колонны. Наименьшее значение $F_w(S)$ достигается при $\nu = 100$.

Таблица 1 – Значения сил, моментов и перемещений в точке подвеса бурильной колонны

№ п/п	$\nu = \frac{\dot{\omega}}{\omega d / 2}$		$F_w(S)$	$M_w(S)$
			(Н)	(Нм)
1	100	без несовершенств	$0,740 \cdot 10^6$	$0,42 \cdot 10^3$
2		с несовершенствами	$0,314 \cdot 10^6$	$0,78 \cdot 10^3$
3	10	с несовершенствами	$0,332 \cdot 10^6$	$7,63 \cdot 10^3$
4	5	с несовершенствами	$0,381 \cdot 10^6$	$14,43 \cdot 10^3$
5	1	с несовершенствами	$0,864 \cdot 10^6$	$31,56 \cdot 10^3$
6	0,1	с несовершенствами	$1,188 \cdot 10^6$	$42,49 \cdot 10^3$
7	0	с несовершенствами	$1,239 \cdot 10^6$	$44,05 \cdot 10^3$

Особенности изменения функций $F_w(s)$ и $M_w(s)$ для разных значений ν можно проследить на рис. 2, 3.

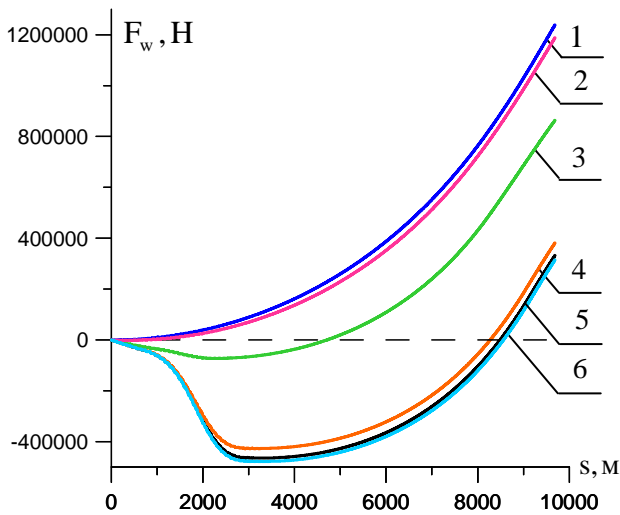


Рис. 2 – Функции продольной силы F_w

Кривые 1 – 6 соответствуют значениям $\nu = 100, 10, 5, 1, 0,1, 0$ (позиции 2 – 7 табл. 1). Отметим, что для функции $F_w(s)$ кривые 1, 2 ($\nu = 100, 10$) монотонно возрастают, в отличие от кривых 4 – 6 ($\nu = 1, 0,1, 0$), которые в зоне наличия несовершенств достигают минимальных отрицательных значений, потом они возрастают. Графики функций $M_w(s)$ являются монотонно возрастающими.

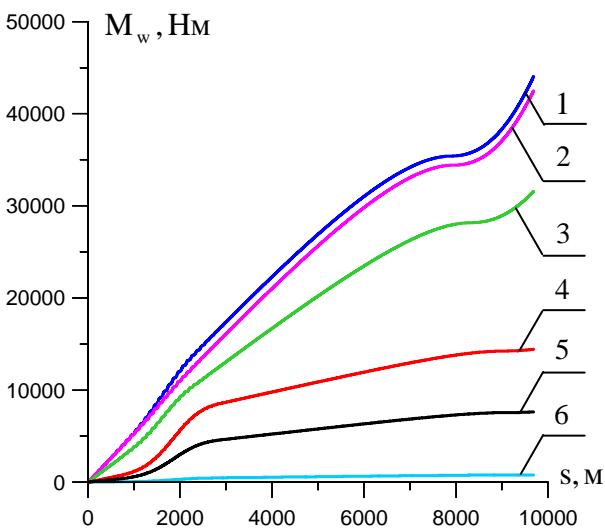


Рис. 3 – Функции крутящего момента M_w

Проведенный численный анализ влияния геометрических параметров гармонических несовершенств на значения функций осевых сил и крутящих моментов показал, что наличие геометрических несовершенств в траекториях осевых

линий бурильных колонн существенно влияет на значение внешних и внутренних силовых факторов. При выполнении операции спуска бурильной колонны, силы тяжести и осевые силы сопротивления перемещению ориентированы в противоположных направлениях, и поэтому они как бы нейтрализуют друг друга. Однако при проведении этой технологической операции возможны нештатные режимы, когда силы сопротивления настолько велики, что силы тяжести не могут их преодолеть, и бурильная колонна застрянет в скважине. На практике для преодоления возникшей нештатной ситуации приходится в верхней части бурильной колонны подгружать ее специальными тяжелыми массами, которые выводят бурильную колонну из аварийной ситуации. В связи с этим можно отметить, что разработанная компьютерная модель движения бурильной колонны в канале скважины позволяет прогнозировать и избегать нештатных ситуаций бурения, связанных с резким увеличением сил сопротивления в зонах наличия геометрических несовершенств.

Выводы

В результате выполненных расчётов для операции спуска бурильной колонны установлено, что выбором значения отношения линейных скоростей осевого и вращательного движений элемента внешней поверхности трубы БК можно регулировать величину осевой силы F_w и крутящего момента M_w , и тем самым предотвращая аварийные ситуации.

Список литературы

- 1 **Chen, Y.-C.** Tubular and casing buckling in horizontal wells / **Y.-C. Chen, Y.-H. Lin, J. B. Cheatham** // *J. of Petroleum Technology*. – 1990. – № 42(2). – P. 140 - 146.
- 2 **Lubinski, A.** Helical buckling of tubing sealed in packers / **A. Lubinski, W. S. Althouse, J. L. Logan** // *J. of Petroleum Technology*. – 1962. – № 14(6). – P. 655 - 670.
- 3 **Mitchell, R. F.** Helical buckling of pipe with connectors and torque / **R. F. Mitchell, and S. Miska** // *SPE Drilling and Completion*. – 2006. – № 21(2). – P. 108 - 115.
- 4 **Paslay, P. R.** The stability of a circular rod laterally constrained to be in a contact with an inclined circular cylinder / **P. R. Paslay, D. B. Bogy** // *J. of Applied Mechanics*. – 1964. – № 31(3). – P. 604 - 610.
- 5 **Gulyayev, V. I.** Modeling the Energy-Saving Regimes of Curvilinear Bore-Hole Drivage / **V. I. Gulyayev, V. V. Gaidaichuk, E. N. Andrusenko, and N. V. Shlyun** // *J. of Offshore Mechanics and Arctics Engineering*. – February, 2015. – V. 137. – № 1. – P. 011402-1–011402-8.
- 6 **Gulyayev, V. I.** Theoretical simulation of geometrical imperfections influence on drilling operations at drivage of curvilinear bore-holes / **V. I. Gulyayev, E. N. Andrusenko** // *J. of Petroleum Science and Engineering*. – 2013. – V.112. – P. 170 - 177.

- 7 **Gulyayev, V. I.** Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes / **V. I. Gulyayev, S. N. Khudoliy, E. N. Andrusenko** // *Interaction and Multiscale Mechanics*. – March, 2011. – V.4. – № 1. – P. 1 - 16.
- 8 **Андрусенко, Е. Н.** Изгиб бурильной колонны в криволинейной скважине с несовершенствами осевой линии / **Е. Н. Андрусенко, В. И. Гуляев, С. Н. Худолій** // *Прикладная математика и механика*. – 2012. – Т. 76. – Вып. 3. – С. 459 - 468.
- 9 **Гуляев, В. И.** Численное моделирование упругого изгиба бурильной колонны в сверхглубокой криволинейной скважине/ **В. И. Гуляев, П. З. Луговой, Е. Н. Андрусенко** // *Прикладная механика*. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 67-76.
- 10 **Гуляев, В. И.** Чувствительность сил сопротивления перемещению бурильной колонны к геометрическим несовершенствам траектории криволинейной скважины / **В. И. Гуляев, Е. Н. Андрусенко** // *Проблемы прочности*. – 2011. – №3. – С. 19 - 34.
- 4 **Paslay, P. R., Bogy, D. B.** The stability of a circular rod laterally constrained to be in a contact with an inclined circular cylinder / *J. of Applied Mechanics*. – 1964. – № 31(3). – P. 604 - 610.
- 5 **Gulyayev, V. I., Gaidaichuk, V. V., Andrusenko, E. N. and Shlyun, N. V.** Modeling the Energy-Saving Regimes of Curvilinear Bore-Hole Drivage / *J. of Offshore Mechanics and Arctics Engineering*. – February, 2015. – № 137(1). – P. 011402-1–011402-8.
- 6 **Gulyayev, V. I., Andrusenko, E. N.** Theoretical simulation of geometrical imperfections influence on drilling operations at drivage of curvilinear bore-holes / *J. of Petroleum Science and Engineering*. – 2013. – № 112. – P. 170 - 177.
- 7 **Gulyayev, V. I., Khudoliy, S. N., Andrusenko, E. N.** Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes / *Interaction and Multiscale Mechanics*. – March, 2011. – № 4(1). – P. 1 - 16.
- 8 **Andrusenko, E. N., Gulyayev, V. I.** The buckling of a drill string in a curvilinear borehole with axial line imperfections / *J. Appl. Math. Mech.* – 2012. – № 76(3). – P. 459 - 468.
- 9 **Gulyayev, V. I., Lugovoi, P. Z., Andrusenko, E. N.** Numerical simulation of elastic bending the drill string deep curvilinear well / *International Applied Mechanics*. – 2014. – № 50(4). – P. 67-76.
- 10 **Gulyayev, V. I., Andrusenko, E. N.** Sensitivity of drill string drag forces to geometrical imperfections of curvilinear well bore trajectory / *Strength of Materials*. – 2011. – № 3. – P. 19 - 34.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Chen, Y.-C., Lin, Y.-H., Cheatham, J. B.** Tubular and casing buckling in horizontal wells / *J. of Petroleum Technology*. – 1990. – № 42(2). – P. 140 - 146.
- 2 **Lubinski, A., Althouse, W. S., Logan, J. L.** Helical buckling of tubing sealed in packers / *J. of Petroleum Technology*. – 1962. – № 14(6). – P. 655 - 670.
- 3 **Mitchell, R. F. and Miska, S.** Helical buckling of pipe with connectors and torque / *SPE Drilling and Completion*. – 2006. – № 21(2). – P. 108 - 115.

Поступила (received) 29.05.2015

УДК 004.94+519.2+539.2

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

А. А. ВОДКА, А. А. ГАМАЮНОВА*, С. В. ЛЕЛЕКА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА
*email: anastasia.0221@yandex.ru

АННОТАЦИЯ В работе розглянуті питання розробки інтегрованого програмного забезпечення для дослідження ймовірнісних характеристик напруженого стану, пружних властивостей полікристалічного матеріалу на прикладі чистої міді. У статті використано розбиття Вороного для побудови геометричної моделі полікристалічного матеріалу. Для побудови скінчено-елементних моделей використані геометричні моделі. Механічні властивості кожного кристала враховують анізотропію його механічних властивостей. Ймовірнісні характеристики визначалися методом Монте-Карло.

Ключові слова: комп'ютерна система, полікристалічний матеріал, розбиття Вороного, метод Монте-Карло, ймовірнісні характеристики, напружений стан

АННОТАЦИЯ В работе рассмотрены вопросы разработки интегрированного программного обеспечения для исследования вероятностных характеристик напряженного состояния, упругих свойств поликристаллического материала на примере чистой меди. В статье использовано разбиение Вороного для построения геометрической модели поликристаллического материала. Для построения конечно-элементных моделей использованы геометрические модели. Механические свойства каждого кристалла учитывают анизотропию механических свойств. Вероятностные характеристики определялись методом Монте-Карло.

Ключевые слова: компьютерная система, поликристаллический материал, разбиение Вороного, метод Монте-Карло, вероятностные характеристики, напряженное состояние

DEVELOPMENT OF THE COMPUTER SYSTEM FOR INVESTIGATIONS OF THE PROBABILITY CHARACTERISTICS OF THE STRESS STATE AND THE ELASTIC MODULI OF THE POLYCRYSTALLINE MATERIALS

O. VODKA, A. HAMAIUNOVA*, S. LELEKA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Metallic materials are widely used in industry. Such materials have well-studied mechanical properties. Most of metallic materials in the macro scale has isotropic characteristics. Consideration of these materials at the micro level shows that they have a complex polycrystalline structure. Each crystal in this structure has a random position in space, anisotropic mechanical properties with an arbitrary orientation of the axes. This leads to considerable jumps in a stressed state at the grain boundaries, which are also random. In order to predict the reliability of polycrystalline materials is important to get the stress state in the grain boundary. To define it, it has been used the finite element method, a geometric model of the microstructure of the material was built with the Voronoi tessellation. Probability characteristics of the stress state determined by the Monte-Carlo method. To implement this method special software was developed. This software builds geometric model, performs calculation and process results.

As a result, the probability characteristics have been determined the minimum, average and maximum stresses in the microstructure of the material and the technique of obtaining averaged isotropic elastic characteristics of the material. Numerical values of the elastic constants obtained for pure copper, in good agreement with the reference data.

Keywords: computer system, polycrystalline material, Voronoi tessellation, Monte-Carlo simulation, probability characteristics, stress state

Введение

Металлические материалы широко применяются в машиностроении. Такие материалы имеют достаточно сложное внутреннее строение, и в макроскопическом масштабе обладают изотропными (не зависящими от направления) механическими свойствами [1]. При рассмотрении материала на микроуровне наблюдается значительное отклонение

его упругих свойства от изотропных, а их величина определяется строением материала. На микроуровне металлические материалы представляют собой поликристаллическую структуру, причем каждый кристалл имеет свою ориентацию в пространстве [2]. Каждый кристалл поликристаллической структуры обладает анизотропными (зависящими от направления) механическими свойствами, характерным всем кристаллам. Анизотропия свойств

и различная ориентация кристаллов при объединении их в поликристаллическую структуру сглаживаются, образуя изотропную в макро объеме структуру [1, 2].

При проведении расчетов на прочной в инженерной практике рассматриваемые материалы на макроуровне традиционно моделируются как изотропные. Такой подход позволяет получить приемлемые для инженерных задач результаты. Однако учет поведения материала на микроуровне позволяет оценить скачки в напряженном состоянии, возникающие между кристаллами. Именно они являются источниками микро и макротрещин.

Еще одной особенностью моделирования материала на микроуровне является отсутствие информации о положении и ориентации кристаллов, так как они зависят от многих факторов, таких как: технология литья, закалки, механической обработки и прочее. Поэтому целесообразно считать положение и ориентацию кристаллов случайными величинами.

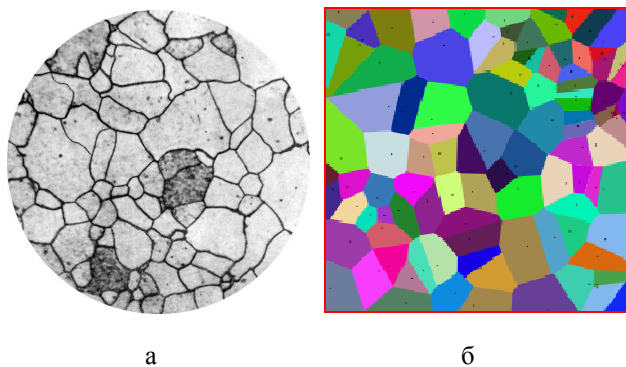


Рис. 1 – Микроструктура протравленной меди и разбиение Вороного для случайного множества точек: а – типовая микроструктура материала; б – разбиение Вороного

Для построения геометрических моделей поликристаллической структуры материала на микроуровне широко используется разбиение Вороного [3, 4, 5]. Это разбиение строится по набору координат точек в трехмерном пространстве, которые показывают центры начала кристаллизации. Далее относительно этих центров выделяются области, которые ближе к одному из центров, чем ко всем остальным. На рис. 1а приведена типовая микроструктура материала, а на рис. 1б показано типовое разбиение Вороного, которое в значительной мере обладает сходством с рис. 1а.

Постановка задачи

Принимая во внимание случайное положение кристаллов и ориентацию их главных осей, для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) выделяют репрезентативный объем,

который обладает свойствами макроуровня, но сконструирован на основе принципов микроуровня. Так как такой объект имеет случайную структуру, то и напряженное состояние будет также случайным. Для определения вероятностных характеристик напряженного состояния такого объекта часто используют метод типа Монте-Карло. Этот метод подразумевает многократное решение детерминированной задачи со случайными исходными данными. Применение данного метода требует создания интегрированной компьютерной системы для моделирования микроструктуры материала с помощью разбиения Вороного.

Таким образом, в работе необходимо разработать интегрированную компьютерную систему для моделирования микроструктуры материала, которая позволяет оценить вероятностные характеристики напряженного состояния микроструктуры материала, получить осредненные параметры материала, выполнить их сравнение с уже полученными ранее результатами.

Разработка управляющей программы

Для написания управляющей системы был выбран язык C# и платформа .NET [6]. Для построения геометрической модели и расчета НДС использован программный комплекс ANSYS [7, 8]. Все операции по построению модели были проведены с использованием языка APDL. Для построения 3D геометрической модели ячейки Вороного была использована библиотека voro++ [9].

Перед началом построения геометрической модели необходимо сгенерировать координаты точек центров каждого зерна, затем, используя функции библиотеки voro++, получить вершины разбиения Вороного.

Используя полученные данные, сгенерируем макрос на языке APDL. Этот макрос включает в себя такие этапы:

1. Построение вершин и центров зерен;
2. Построение ребер зерен путем соединения вершин (рис 2а);
3. Линии, входящие в одно зерно, объединим в поверхности, а их в объемы (рис. 2б). На рисунке изображена внутренняя часть куба, исключая несколько внешних зерен;
4. Каждому объему присвоим систему координат, углы поворота которых сгенерированы случайным образом. (рис. 2в);
5. Для создания конечно-элементной (КЭ) модели и построения КЭ сетки используется 4-х узловой конечный элемент с тремя степенями свободы в узле. КЭ модель приведена на рис. 2в;
6. В качестве граничных условий на нижней поверхности куба запрещены перемещения по оси Y. Для стабилизации решения в точке,

находящейся в центре координат, запрещены все перемещения. На верхнюю грань куба приложено давление в размере 1 МПа (рис. 2г).

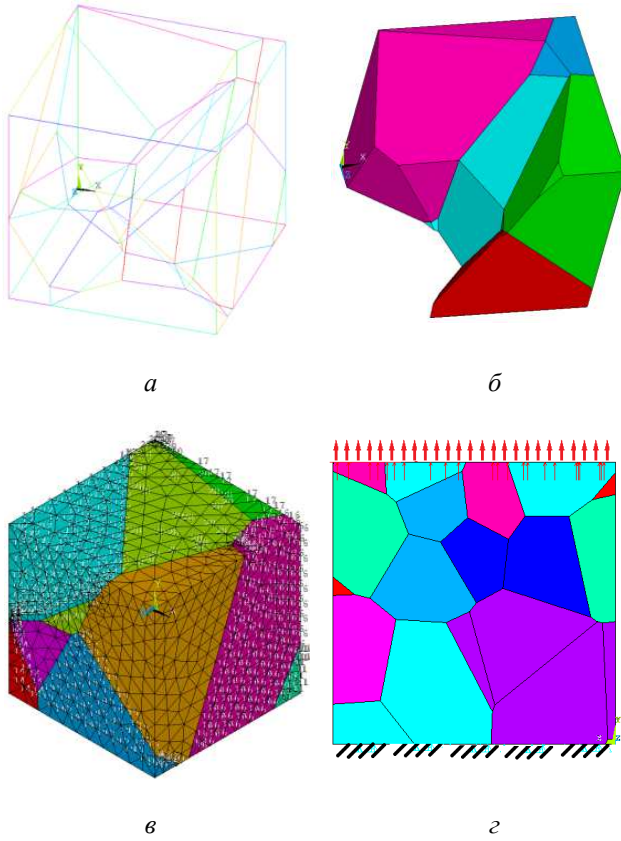


Рис. 2 – Этапы построения модели:
а, б – геометрические модели; в – КЭ сетка;
г – граничные условия

После построения модели производится статический расчет НДС. Согласно методу Монте-Карло это расчет повторяется 100 раз. При этом каждый раз генерируются новые центры кристаллизации и ориентация кристаллов, а библиотека voro++ каждый раз генерирует новое разбиение Вороного.

Разработка пользовательского интерфейса

Проектирование интерфейса проводилось в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio 2013 с использованием технологии Windows Forms [10]. Программа состоит из одного главного окна, двух дополнительных вкладок, полей для ввода и выбора данных, поля для отображения результатов. На рис. 3 представлен внешний вид программного продукта.

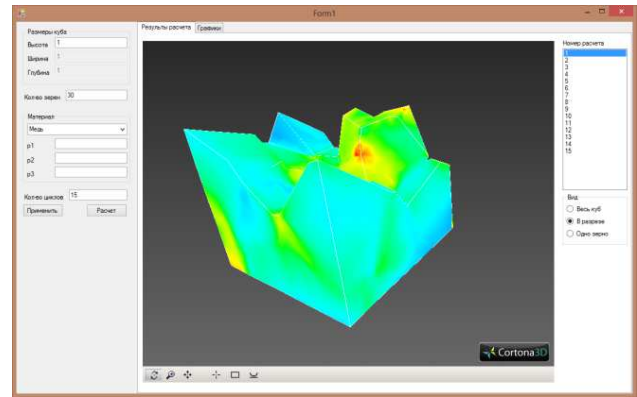


Рис. 3 – Внешний вид программного продукта

На рис. 4 приведен алгоритм работы программного продукта

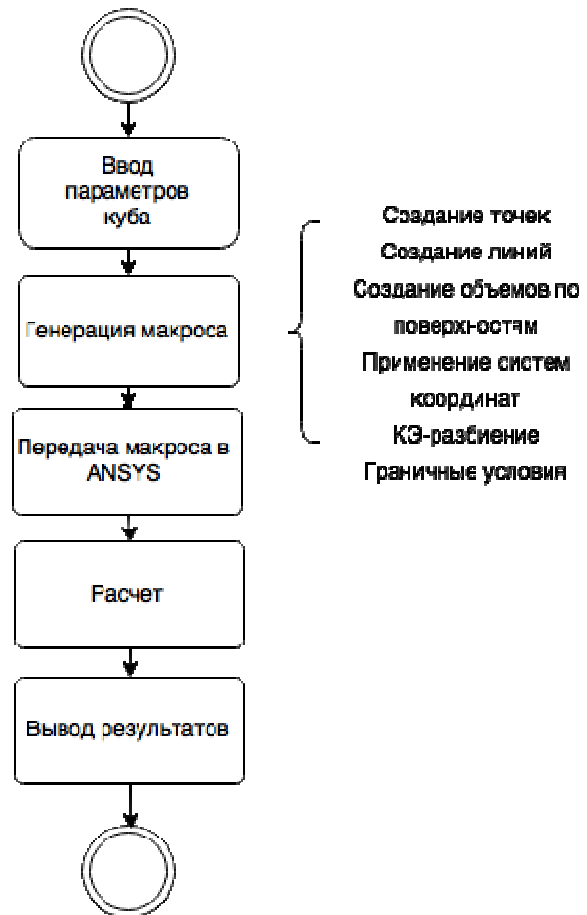


Рис. 4 – Алгоритм работы программы

Основные принципы работы программы

Разработанная программа имеет следующие возможности:

1. Изменение размеров репрезентативного объема (куба);
2. Варьирование количеством зерен в репрезентативном объеме;

3. Выбор материала. Константы материала определяются пользователем;
4. Количество итераций метода Монте-Карло.

После ввода необходимых параметров активируется кнопка «Применить», после нажатия, на которую проводится запись всех параметров в файл настроек. При нажатии на кнопку «Расчет» последовательно запускаются расчеты, количество которых соответствует введенному значению.

В соответствии с записанными данными при каждом расчете генерируется макрос, таким образом, чтобы параметры куба, соответствующие считанным настройкам, на протяжении цикла остаются постоянными, а параметры зерен: расположение и форма на каждом шаге цикла изменяются.

В правой части вкладки «Результаты расчета» находится список проведенных расчетов, который показывает напряженно-деформированное состояние куба при разном его строении. Ниже можно выбрать тип отображения модели. В данной программе, ячейка может отображаться в трех видах: весь куб, куб в разрезе и вид одного зерна.

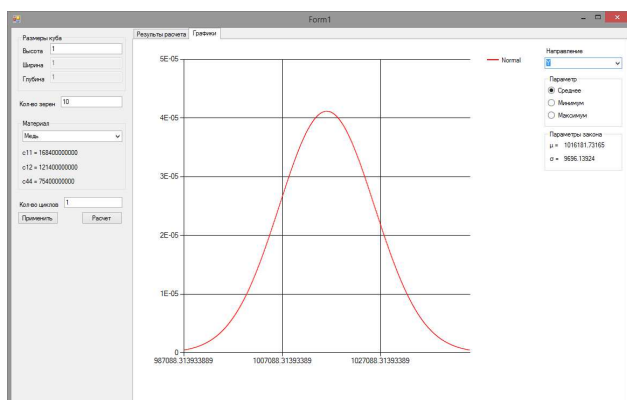


Рис. 5 – Внешний вид вкладки «Графики»

Вкладка «Графики» (рис. 5), позволяет просматривать результаты определения плотности вероятности. Справа, в выпадающем списке, можно выбрать направление напряжения, модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Среднее напряжение – это математическое ожидание всех средних напряжений для каждого расчета. Минимальное (максимальное) напряжение – это математическое ожидание всех минимальных (максимальных) напряжений для каждого расчета.

В блоке «Параметры закона» показаны полученные значения математического ожидания и среднего квадратичного отклонения.

Взаимодействие пользователя с разработанным программным продуктом можно представить в виде диаграммы прецедентов (рис. 6).

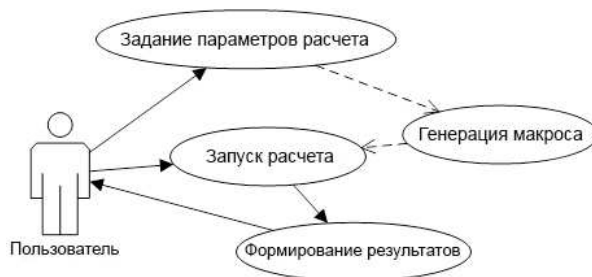


Рис. 6 – Диаграмма прецедентов

Тестирование программного продукта

Тестирование работы программного продукта проводилось на примере чистой меди. Кристаллы чистой меди обладают кубической гранцентрированной решеткой с упругими константами $c_{11} = 168,4$ ГПа, $c_{12} = 121,4$ ГПа, $c_{44} = 75,4$ ГПа.

Согласно методу Монте-Карло проведем серию расчетов и усредним результаты. Для этого в главном окне программы выберем исследуемый материал, а количество расчетов зададим равным 100. Программа выполнит 100 итераций и выведет все необходимые данные на экран. На вкладке «Результаты расчетов» приводится список расчетов, при нажатии на который, можно увидеть напряженно-деформированное состояние для каждой итерации. Также можно изменить внешний вид отображения. На рис. 7 изображено НДС, возникающие в зернах и на их границах.

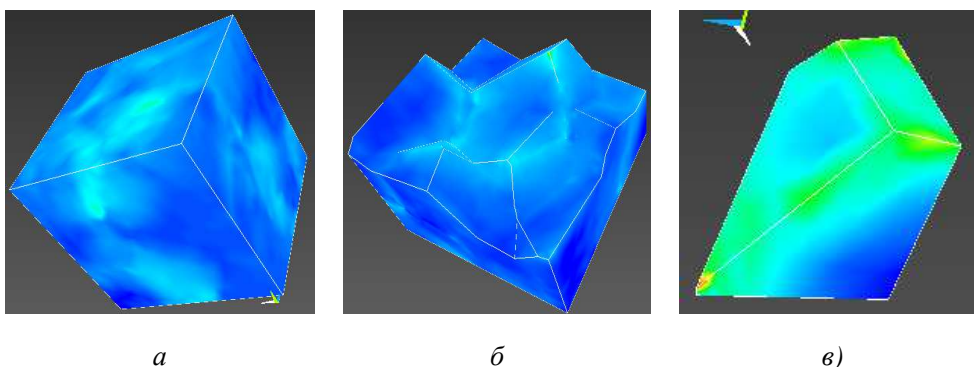


Рис. 7 – НДС в репрезентативном объеме:
а – весь куб, б – в разрезе, в – одно зерно

Обработка результатов

По результатам работы программы были построены гистограммы, нормированных по нагрузке, минимальных (рис. 8а), средних (рис. 8б) и максимальных (рис. 8в) напряжений [11]. Согласно теореме Фишера-Типпетта-Гнеденко [12], минимальные и максимальные напряжения подчиняются обобщенно-экстремальному распределению (1), а средние напряжения согласно центральной предельной теореме подчиняются нормальному закону (2), где ζ – нормированная случайная величина (3), k, s, μ – параметры распределения.

Для полученных распределений были определены математическое ожидание (МО) (4) и дисперсия (5). Полученные результаты сведены в табл. 1.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{s} \exp(-(1+k\zeta)^{-1/k})(1+k\zeta)^{-1-1/k} & k \neq 0 \\ \frac{1}{s} \exp(-\zeta - \exp(-\zeta)) & k = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2}\right), \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{x - \mu}{s}, \quad (3)$$

$$M[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx, \quad (4)$$

$$\text{var}[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M[x])^2 f(x) dx. \quad (5)$$

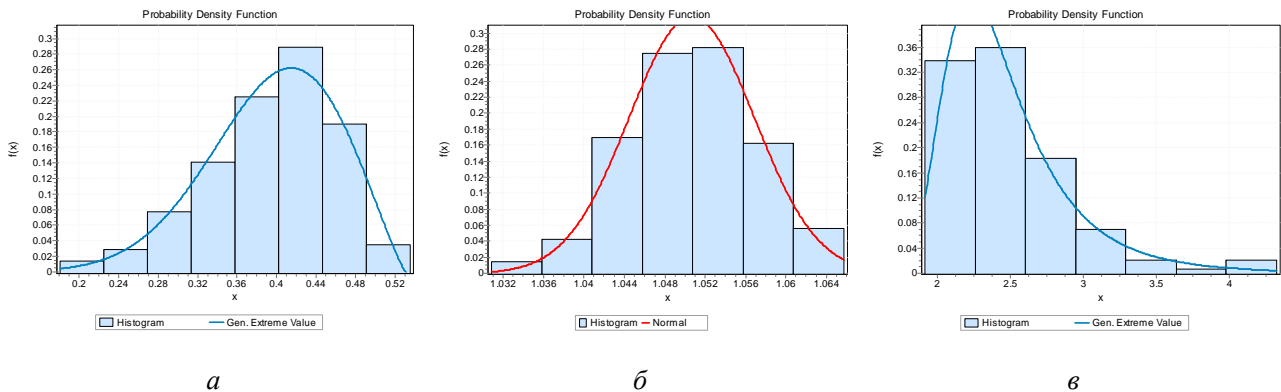


Рис. 8 – Гистограммы и аппроксимирующие их законы: а – минимальных; б – средних; в – максимальных напряжений

Табл. 1 – Параметры законов распределения и их вероятностные характеристики

поз. рис. 10	μ	k	s	$M[x]$	$\text{var}[x]^{1/2}$
а	0.377	-0.45845	0.07029	0.39459	0.00431
б	1.050	–	0.00621	1.0507	0.00621
в	2.273	0.13787	0.29101	2.4865	0.46558

Из анализа полученных результатов (табл. 1) видно, что МО минимальных напряжений в 2,66 раза меньше, чем МО средних напряжений. А МО максимальных напряжений в 2,33 раза больше средних. Таким образом, отклонения максимальных и минимальных напряжений по отношению к средним – весьма значительны. Анализируя среднеквадратичное отклонение (СКО) напряжений, можно сделать вывод, что минимальные и средние напряжения обладают незначительным разбросом по отношению к МО. Однако СКО максимальных напряжений на два порядка больше, чем для других напряжений, что свидетельствует о значительном разбросе максимальных напряжений.

С помощью полученных данных о напряженно-деформируемом состоянии ячейки были определены осредненные изотропные характеристики материала. Для этого были найдены средние по объему компоненты тензоров напряжений (σ) и деформаций (ϵ), через которые были выражены осредненный объемный (K) и сдвиговой (G) модули [13]:

$$K = \frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{\epsilon_1}, \quad (6)$$

$$G = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i}, \quad (7)$$

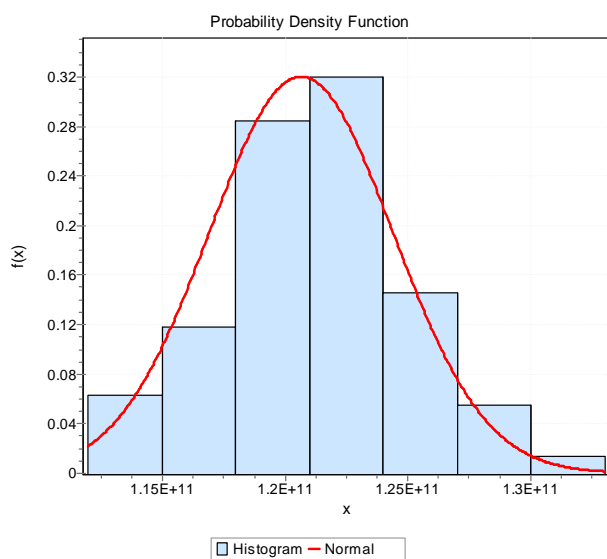
где σ_1 и ε_1 – средние первые главные напряжения и деформации, соответственно, σ_i и ε_i – средние эквивалентные напряжения и деформации по Мизесу, соответственно.

Из этих двух модулей могут быть найдены модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν [13]:

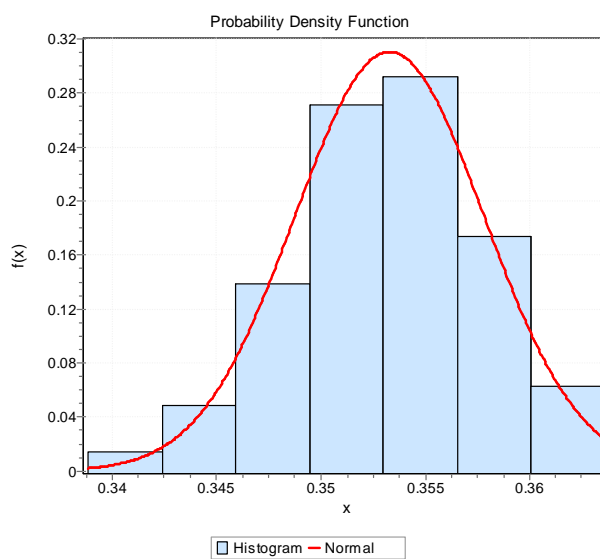
$$E = \frac{9KG}{3K + G}, \quad (8)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G}. \quad (9)$$

Определив модуль упругости и коэффициент Пуассона на каждой итерации метода Монте-Карло можно определить их вероятностные характеристики. В силу центральной предельной теоремы E и ν должны подчиняться нормальному закону.



а



б

Рис. 9 – Гистограммы и аппроксимирующий их нормальный закон:
а – модуль упругости, б – коэффициент Пуассона

Полученные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона представлены в табл. 2, из которой видно, что среднее значение соответствует справочным данным [13]. Также построены кривые распределения для этих характеристик, показывающая разброс возможных значений (рис. 9).

Табл. 2 – Вероятностные характеристики модуля упругости и коэффициента Пуассона

Параметр	Значение
$M[E]$, ГПа	120,6
$\text{var}[E]^{1/2}$, ГПа	3,73
$M[E] \pm 3\text{var}[E]$, ГПа	$120,6 \pm 11,2$
$M[\nu]$	0,353
$\text{var}[\nu]^{1/2}$	$4,54 \times 10^{-3}$
$M[\nu] \pm 3\text{var}[\nu]$	$0,353 \pm 0,013$

Выводы

В работе выполнено исследование вероятностных характеристик напряженного состояния и упругих свойств материала. Разработана интегрированная компьютерная система для

моделирования микроструктуры материала. Построена КЭ-модель ячейки Вороного. Выполнен расчет НДС модели. Получены оценки вероятностных характеристик напряжений в ячейке. Сравнение исходных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона с полученными в результате работы показало хорошее соответствие результатов.

Анализ вероятностных характеристик напряженного состояния ячейки показал, что наибольшими разбросом обладают максимальные напряжения. Причем МО максимальных напряжений в 2,33 раза превышает МО средних напряжений. Также именно максимальные напряжения обладают наибольшей дисперсией.

Результаты по определению изотропных упругих констант для чистой меди показали, что известные результаты лежат внутри доверительного интервала, полученного в результате расчета, что свидетельствует о корректности построенных моделей.

Список литературы

1. Honeycombe, R. W. K. The Plastic Deformation of Metals / R. W. K. Honeycombe – E. Arnold. – 1984. – 483с.

2. **Nye, J. F.** Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices / **J. F. Nye.** – Clarendon Press. – 1985. – 329с.
3. **Ozhoga-Maslovskaja, O.** Micromechanical simulation of grain boundary cavitation in copper considering non-proportional loading / **O. Ozhoga-Maslovskaja, K. Naumenko, H. Altenbach, O. Prygorniev** // *Comput. Mater. Sci.* – 2015. – Т. 96 – 178-184с.
4. **Fritzen, F.** Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi tessellations / **F. Fritzen, T. Böhlke, E. Schnack** // *Comput. Mech.* – 2008. – Т. 43 – № 5 – 701-713с.
5. **Simonovski, I.** Towards modeling intergranular stress corrosion cracks on grain size scales / **I. Simonovski, L. Cizelj** // *Nucl. Eng. Des.* – 2012. – Т. 246 – 107-114с.
6. **Troelsen, A.** Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework / **A. Troelsen** – Apress. – 2012. – 1560с.
7. **Lawrence, K. L.** ANSYS Workbench Tutorial Release 14 / **K. L. Lawrence** – SDC Publications. – 2012. – 291с.
8. **Басов, К.** ANSYS. Справочник пользователя / **К. Басов** – ЛитРес. – 2014.
9. **Rycroft, C. H.** VORO++: a three-dimensional voronoi cell library in C++. / **C. H. Rycroft** // *Chaos* – 2009. – Т. 19 – № 4 – 411с.
10. **Johnson, B.** Professional Visual Studio 2013 / **B. Johnson** – John Wiley & Sons. – 2014. – 1104с.
11. **Coles, S.** An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values / **S. Coles** – 2001.
12. **Игоревич, И. Р.** Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad / **И. Р. Игоревич** – БХВ-Петербург. – 2008. – 528с.
13. **Rattan, S. S.** Strength of Materials / **S. S. Rattan** – Tata McGraw-Hill Education. – 2008. – 585с.

Bibliography (transliterated)

1. **Honeycombe, R. W. K.** The Plastic Deformation of Metals. - E. Arnold. – 1984. – 483 s.
2. **Nye, J. F.** Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices / *Clarendon Press.* – 1985. – 329 s.
3. **Ozhoga-Maslovskaja, O., Naumenko, K., Altenbach, H., Prygorniev, O.** Micromechanical Simulation of Grain Boundary Cavitation in Copper Considering Non-Proportional Loading / *Computational Materials Science.* – № 96. – 2015. – S. 178-184.
4. **Fritzen, F., Böhlke, T., and Schnack, E.** Periodic Three-Dimensional Mesh Generation for Crystalline Aggregates Based on Voronoi Tessellations / *Computational Mechanics* – 2008. – № 43.5. – S. 701-713.
5. **Simonovski, I., Leon, I.** Towards Modeling Intergranular Stress Corrosion Cracks on Grain Size Scales / *Nuclear Engineering and Design* 246. – 2012. – S. 107-114.
6. **Troelsen, A.** Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 Framework / *Apress.* – 2012. – 1560 s.
7. **Lawrence, K. L.** ANSYS Workbench Tutorial Release 14. / *SDC Publications.* – 2012. – 291 s.
8. **Basov, K.** ANSYS. Spravochnik Pol'zovatelja / *LitRes,* 2014.
9. **Rycroft, C. H.** VORO++: A Three-Dimensional Voronoi Cell Library in C++ / *Chaos (Woodbury, N.Y.)* 19.4. – 2009. – 411 s.
10. **Johnson, B.** Professional Visual Studio 2013 / *John Wiley & Sons.* – 2014. – 1104 s.
11. **Coles, S.** An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. N.p. – 2001.
12. **Igorovich, I. R.** Teorija Verojatnostej I Matematicheskaja Stati-stika. Osnovy, Prikladnye Aspekty S Primerami I Zadachami V Srede Mathcad / *BHV-Peterburg.* – 2008. – 528 s.
13. **Rattan, S. S.** Strength of Materials / *Tata McGraw-Hill Education.* – 2008. – 585 s.

Поступила (received) 01.06.2015

УДК: 539.3

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМОЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ ОТ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОСЕЙ

Ю. С. ВОРОБЬЕВ^{1*}, Н. Ю. ОВЧАРОВА¹, Т. Ю. БЕРЛИЗОВА²

¹ Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, УКРАИНА

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

*email: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ Рассматривается температурное и термоупругое состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для выхода охлаждающего воздуха. Задача определения напряженно деформируемого состояния лопатки под действием температурных полей и центробежных сил решается методом конечных элементов. Рассмотрено влияние ориентации кристаллографических осей, на распределение и величину термоупругих напряжений по объему лопатки.

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка, температурные поля, центробежные силы, термоупругие напряжения, монокристаллический материал, кристаллографические оси

АНОТАЦІЯ Розглядається температурний та термопружний стани охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження і каналами для виходу охолоджуючого повітря. Задача визначення напружено деформованого стану лопатки під дією температурних полів і відцентрових сил вирішується методом скінчених елементів. Розглянуто вплив орієнтації кристаллографічних вісей, на розподіл і величину термопружних напружень по об'єму лопатки.

Ключові слова: охолоджувана лопатка, температурні поля, відцентровані сили, термопружні напруження, монокристалічний матеріал, кристаллографічні вісі

DEPENDENCE OF THERMOELASTICITY STATUS OF THE COOLING MONOCRYSTALLINE BLADES FROM AZIMUTHAL ORIENTATION CRYSTALLOGRAPHIC AXES

Yu. VOROBIEV¹, N. OVCHAROVA¹, T. BERLIZOVA²

¹A.N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems NAS, Kharkov, UKRAINE

²National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The thermal and thermo-elastic states of the single crystal cooled blade with the complex vortex cooling system and channels for output of the cooling air are considered. Temperature fields of cooled blades are determined by the temperature of gas and cooling air. They cause thermal expansion of the blade, which should be considered in case of definition of the clearances in the labyrinth sealings. Due to the large temperature gradients in such blades large thermoelastic stresses are arises. All this leads to the need to solve the thermal and thermoelastic problem for determining the stress strain state of the blade under the influence of temperature fields and centrifugal forces. Static stress strain state of the blade is determined by taking into account the temperature fields and centrifugal forces. The problem is solved by finite element method. The value of maximum stress depends mostly from the temperature condition of the blade, but the maximum stresses arising in the joint action of the centrifugal forces and temperature fields, but do not achieve the tensile strength. The influence of the orientation of the crystallographic axes on the distribution and value of thermoelastic stresses by volume of blade are considered. The stress distribution by volume the blades have rather complex character. When the vortex system of cooling, the channels for cooling air are arranged at an angle to the longitudinal axis of the blade. If change the orientation of the crystallographic axes occurs redistribution of the stress and changes the whole picture of the stress-strain state of the blades. Since the largest stress intensity can be in a new area of the blade, they will also depend on the geometrical features of this area and its temperature. If change the axial orientation of the crystallographic axes, the greatest stress intensity repeating periodically through the 90°. The results of research allow estimating the stress-strain state of the cooled single crystal blades in the inhomogeneous temperature field with the taking into account of the influence of the crystallographic axes, which is of practical interest.

Keywords: cooled blade, temperature fields, centrifugal forces, thermoelastic stresses, single crystal material, crystallographic axes.

Введение и постановка задачи

В современных газотурбинных двигателях рабочие лопатки турбин подвержены воздействию высокотемпературного газового потока. Поэтому

лопатки изготавливаются из жаропрочных сплавов при одновременном использовании охлаждения через внутренние каналы. В современном производстве все чаще используются жаропрочные монокристаллические сплавы и сложные системы вихревого

охлаждения. В связи с большими градиентами температур в таких лопатках возникают большие термоупругие напряжения. Следует также учитывать температурное расширение лопатки, что влияет на зазоры в лабиринтных уплотнениях. Все это приводит к необходимости решать температурную и термоупругую задачи для определения напряженно деформированного состояния лопатки под действием температурных полей и центробежных сил. Внешнее охлаждение часто используется на части поверхности лопатки, например в области выходной кромки. Возникающие при этом в теле лопатки градиенты температуры вызывают высокие температурные напряжения. Наибольшей статической прочностью обладают современные жаропрочные монокристаллические сплавы, упругие свойства которых зависят от ориентации кристаллографических осей (КГО) [1 - 10].

Хорошо известно, что изменение положения КГО существенно влияет на распределение и величину термоупругих напряжений. Целью данной работы является исследование влияния изменения азимутальной ориентации кристаллографических осей на термоупругое напряженно-деформированное состояние лопатки, что представляет актуальную задачу.

Объект исследования и его расчетная модель

В данном случае рассматривается охлаждаемая монокристаллическая лопатка с эффективной, но сложной системой вихревого охлаждения [11]. Рис. 1 дает представление о конструкции лопатки, система охлаждающий каналов, расположении КГО и направлении их поворота в процессе исследований.

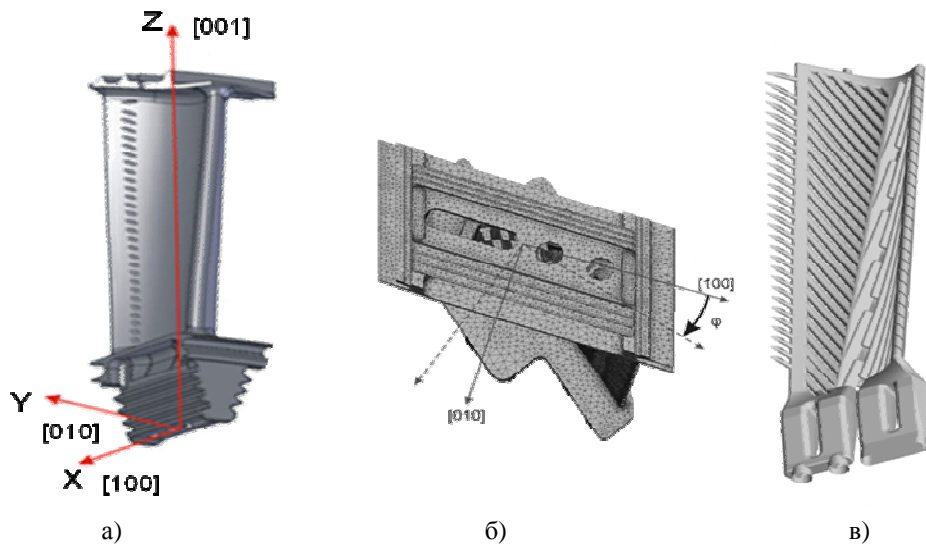


Рис. 1 – Охлаждаемая лопатка с обозначением монокристаллических осей (а), направление поворота КГО (б) и ее система внутренних охлаждаемых каналов в виде вихревой матрицы (в)

Вблизи выходной кромки расположены каналы для выхода охлаждающего воздуха, что обеспечивает внешнее охлаждение довольно тонкой выходной кромки. Возникающее температурное поле с высокими градиентами температур вызывает температурное расширение лопаток и высокие температурные напряжения. Поэтому необходимо решение взаимосвязанных задач определения температурного и термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки.

Численный анализ температурного и термоупругого состояния лопатки

В качестве исходных данных были заданы температуры различных участков лопатки, которые

менялись от 580 °С до 810 °С. С помощью осреднения было получено температурное поле лопатки.

Кроме того решалась задача теплопроводности для случая, когда температура газа на поверхности лопатки 850 °С, а температура охлаждающего воздуха на входе в систему охлаждения - 600 °С

Данная лопатка имеет перепад температур как в продольном направлении, так и в поперечных сечениях. Поэтому задача должна решаться как трехмерная [11, 12].

В качестве исходных данных были заданы температура участков лопатки. С помощью осреднения было получено температурное поле лопатки. Кроме того, решалась задача теплопроводности, когда была известна температура газа на поверхности лопатки и температура охлаждающего воздуха. В данном случае

рассматривается стационарная задача теплопроводности, которая сводится к решению вариационного уравнения $\delta J = 0$ для функционала

$$J = \frac{1}{2} \iiint_V \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz + \frac{1}{2} \sum_k \iint_{(S_k)} h_k (T - T_k)^2 dS_k, \quad (1)$$

где V – объем тела,

T – температура;

λ – коэффициент теплопроводности;

S_k – поверхность участков лопатки и охлаждающих каналов,

k – номера участков поверхности лопатки и охлаждающих каналов.

Характер матриц податливости для данной задачи с учетом свойств монокристаллического материала описан в работах [4, 11, 12]. Решение задачи термоупругости позволяет провести анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Оно проводилось совместно с задачей о напряженно-деформированном состоянии лопатки под действием центробежных сил. В общем случае матрица податливости для монокристаллической лопатки является полностью заполненной [4]. В данном случае кристаллографические оси [100], [010], [001] совпадают с осями лопатки x , y , z . При этом матрица податливости приобретает вид:

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Зависимости коэффициентов матрицы податливости (2) от температуры T для монокристаллической лопатки могут быть представлены в виде [4]

$$\begin{aligned} s_{11} &= h_{11} + h_{12}T + h_{13}T^2; \\ s_{12} &= h_{21} + h_{22}T + h_{23}T^2; \\ s_{44} &= h_{31} + h_{32}T + h_{33}T^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где h_{ij} – коэффициенты, определяемые для конкретного материала.

Центробежные силы вызывают наибольшую интенсивность напряжений порядка 1 МПа [12], в то время как наибольшая интенсивность термоупругих напряжений достигает 260 МПа. Причем наблюдается большая неоднородность распределения напряжений и проявление их локализации. Известно, что ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на распределение полей напряжений. В данном случае исследовалось влияние поворота кристаллографических осей в плоскости xy вокруг оси z , которая соответствует кристаллографической оси [001].

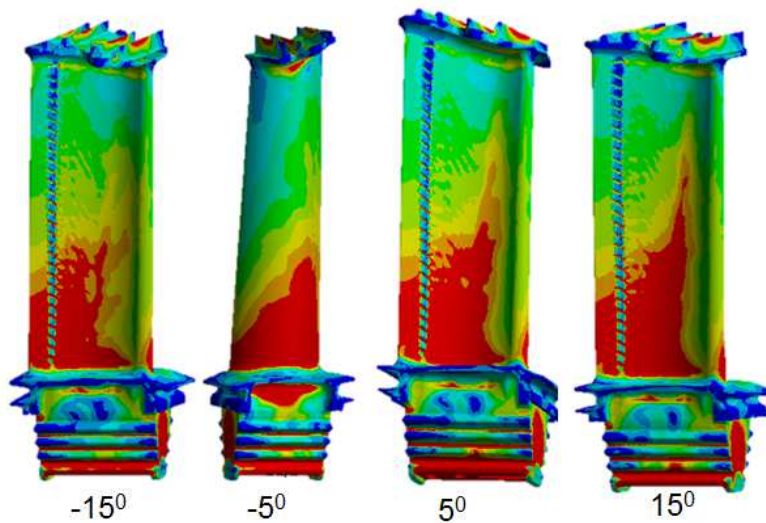


Рис. 2 – Изменение полей интенсивностей напряжений на поверхности лопатки при повороте кристаллографических осей от -15° до 15° .

На рис. 2 показано влияние поворота кристаллографических осей на распределение интенсивностей напряжений на поверхности лопатки.

Видно общее снижение интенсивности термоупругих напряжений от корня к периферии и существенное изменение полей напряжений при повороте кристаллографических осей.

Наличие отверстий для выхода охлаждающего воздуха значительно снижает температуру и интенсивность напряжений у выходной кромки лопатки.

Распределение напряжений по объему лопатки носят довольно сложный характер. При вихревой системе охлаждения каналы для охлаждающего

воздуха расположены под углом к продольной оси лопатки. При изменении ориентации кристаллографических осей происходит перераспределение всех напряжений и изменение всей картины НДС лопатки. Так как наибольшие интенсивности напряжений могут быть при этом в новой области лопатки, то они будут зависеть также от геометрических особенностей этой области и ее температуры. Целесообразно построить некоторую кривую, которая отражает изменение наибольших интенсивностей напряжений независимо от места их расположения при изменении ориентации КГО (рис. 3).

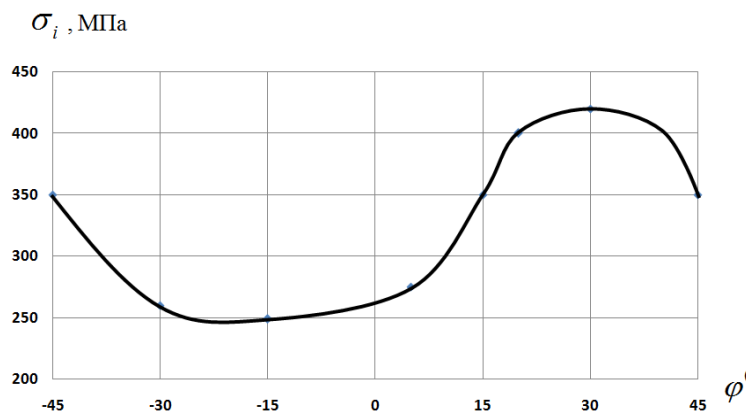


Рис.3 – Изменение наибольших интенсивностей напряжений в лопатке при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001] на угол φ

Видно, что при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001], совпадающей с осью z, наибольшие интенсивности напряжений изменяются периодически, повторяясь через 90° . Периодическое изменение частотных характеристик лопатки наблюдается при изменении азимутальной ориентации КГО [13], при этом места локализации статических и вибрационных напряжений могут совпадать.

Выводы

Температурное состояние охлаждаемой лопатки зависит от температуры газа, охлаждающего воздуха и конструкции лопатки. Оно влияет на изменение геометрических размеров лопатки, что следует учитывать при определении зазоров в лабиринтных уплотнениях.

Основной вклад в НДС лопатки вносят термоупругие напряжения. Напряжения от центробежных сил достигают значительно меньших значений. При повороте кристаллографических осей вокруг оси z по часовой стрелке наблюдается тенденция повышения наибольших интенсивностей напряжений более чем на 30%. При этом

минимальные интенсивности напряжений наоборот снижаются, так что некоторый средний уровень напряжений сохраняется. При повороте кристаллографических осей против часовой стрелки происходит обратный процесс. Общая картина НДС циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на 90° (от -45° до 45°). Однако, максимальные интенсивности напряжений значительно ниже статического предела прочности для монокристаллических материалов.

Список литературы

1. **Ножницкий, Ю. А.** О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД / **Ю. А. Ножницкий, Е. Р. Голубовский** // *Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Тр. ЦКТИ.* – Вып. 296. – СПб, 2009. – С. 74 – 82.
2. **Зысина-Моложан, Л. М.** Теплообмен в турбомашине / **Л. М. Зысина-Моложан, Л. В. Зысин, М. П. Поляк.** – Л. Машиностроение, 1974. – 336 с.
3. **Wolf, D. S.** Stress analysis of a first turbine vane using 3-dimensional model with non-linear material behavior subjected to transient temperatures // *AIAA Pap.* №1437. – 1981. – 5 p.

4. Шалин, Р. Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов: моногр. / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
5. Придорожный Р. П. Влияние кристаллографической ориентации на объемное напряженно-деформированное состояние монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, // *Вестник двигателестроения* – 2003. – №1. – С. 47-51.
6. Придорожный, Р. П. Оценка влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в системе перфорационных отверстий / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – №1. – С.53-57.
7. Копелев, С. З. Охлаждаемые лопатки газовых турбин: Расчет и профилирование. – М.: Наука, 1983. – 145 с.
8. Carter, T. J. Common failures in gas turbine blades / T. J. Carter // *Engineering Failure Analysis* – 2005. 12(2) – P. 237-247.
9. Yahya, S. M. Turbines Compressors and Fans / S. M. Yahya // *New delhi: Tata McGraw-Hill Education*. – 2010. P. 430–433. ISBN 9780070707023.
10. Ebrahimia, F. / Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals / F. Ebrahimia, L. E. Foreroa, S. Siddiquib, N. Arakereb // *Mechanical and Aerospace Engineering*. University of Florida, Gainesville, FL, United States. – May 2006.
11. Жондковски, Р. Анализ термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД / Р. Жондковски, Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Евченко // *Механіка та машинобудування*. – 2013. – № 1 – С. 23 – 28.
12. Воробьев, Ю. С. Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД / Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Берлизова, С. Б. Кулишов, А. Н. Скрицкий // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харьков: НАКУ «ХАИ» – 2014. – № 10 (117). – С. 75 – 78.
13. Vorobiov, Iu. S. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades / Iu. S. Vorobiov, K. Yu. Dyakonenko, S. B. Kulishov, A. N. Skritskij and R. Rzdkowski // *Journal of vibration engineering & technologies*. – Vol. 2, No. 6, December 2014. – P. 537-541.
2. Zysina-Molozhan, L. M., Zysin, L. V., Polyak, M. P. Teploobmen v turbomashinakh – L. Mashinostroyeniye, 1974. – 336 s.
3. Wolf, D. S. Stress analysis of a first turbin vane using 3-dimensional model with non-linear material behavior subjected to transient temperatures // *AIAA Pap.* №1437.– 1981. – 5 p.
4. Shalin, R. Ye., Svetlov, I. L., Kachanov, Ye. B. et. al. Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov: monogr. – М.: Mashinostroyeniye, 1997. – 336 s.
5. Pridorozhnyy, R. P., Sheremet'yev, A. V. Vliyaniye kristallograficheskoy orientatsii na ob'yemnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye monokristallicheskoy neokhlazhdayemoy lopatki turbiny. *Vestnik dvigatelestroyeniya* – 2003. – №1. – S. 47-51.
6. Pridorozhnyy, R. P., Sheremet'yev, A. V., Zin'kovskiy, A. P. Otsenka vliyaniya azimutal'noy orientatsii na napryazhennost' monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki v sisteme perforatsionnykh otverstiy. *Vestnik dvigatelestroyeniya*. – 2013. – №1. – S. 53-57.
7. Kopelev, S. Z. Okhlazhdayemye lopatki gazovykh turbin: Raschet i profilirovaniye. – М.: Nauka – 1983. – 145 s.
8. Carter, T. J. Common failures in gas turbine blades. *Engineering Failure Analysis* - 2005. 12(2) – P. 237-247.
9. Yahya, S. M. Turbines Compressors and Fans *New delhi: Tata McGraw-Hill Education*. – 2010. – P. 430-433. ISBN 9780070707023.
10. Ebrahimia, F., Foreroa, L. E., Siddiquib, S., Arakereb, N. Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals. *Mechanical and Aerospace Engineering*. University of Florida, Gainesville, FL, United States. – May 2006.
11. Zhondkovski, R., Vorob'yev, Yu. S., Ovcharova, N. Yu., Yevchenko, T. Yu. Analiz termouprugogo sostoyaniya okhlazhdayemoy monokristallicheskoy lopatki GTD. *Mekhanika ta mashinobuduvannya*. – 2013. – № 1 – S. 23 – 28.
12. Vorob'yev, Yu. S., Ovcharova, N. Yu., Berlizova, T. Yu., Kulishov, S. B., Skritskiy, A. N. Osobennosti temperaturnogo i termouprugogo sostoyaniya monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki GTD. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. – Khar'kov: NAKU «KHAI» – 2014, №10 (117). – S. 75 – 78.
13. Vorobiov, Iu. S., Dyakonenko, K. Yu., Kulishov, S. B., Skritskij, A. N. and Rzdkowski, R. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades. *Journal of vibration engineering & technologies*. – Vol. 2, No. 6, December 2014. – S. 537-541.

Bibliography (transliterated)

1. Nozhnitskiy, Yu. A., Golubovskiy, Ye. R. O prochnostnoy nadezhnosti monokristallicheskiykh rabochiykh lopatok vysokotemperaturnykh turbin perspektivnykh GTD. *Prochnost' materialov i resursy elementov energooborudovaniya*. Tr. TSKTI. – Вып. 296. – SPb, 2009. – S. 74 – 82.

Поступила (received) 15.05.2015

УДК 621.785.53

ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ІНСТРУМЕНТУ ЗІ СТАЛІ 38Х2МЮА КОМПЛЕКСНОЮ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

К. О. КОСТИК

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА
email: eklitus@vandex.ru

АННОТАЦІЯ Хіміко-термічна обробка веде к різкій зміні властивостей поверхневих шарів металу, а саме міцності, в'язкості, зносостійкості, опору корозії, жаростійкості, магнітних властивостей та ін. Метою науково-дослідної роботи є вивчення структури та властивостей інструменту після хіміко-термічної обробки у нанодисперсній порошковій суміші. Розроблено комплексну обробку, яка полягала у послідовній нітроцементації та боруванні. Апроксимацією експериментальних даних отримані рівняння, які дозволяють прогнозувати товщину боридного шару та коефіцієнт дифузії атомарного бору для легованої сталі в діапазоні температур від 800 °С до 1000 °С при комплексній обробці. Нова технологія дозволяє скоротити тривалість насичення атомарними елементами в 4-5 разів, що значно зменшує енергозатрати, отримати необхідні експлуатаційні властивості та суміщати насичення поверхневого шару атомарним бором із гартуванням.

Ключевые слова: хіміко-термічна обробка, зміцнення інструменту, нітроцементація, борування

АННОТАЦИЯ Химико-термическая обработка ведет к резкому изменению свойств поверхностных слоев металла, а именно прочности, вязкости, износостойкости, сопротивления коррозии, жаростойкости, магнитных свойств и др. Целью научно-исследовательской работы является изучение структуры и свойств инструмента после химико-термической обработки в нанодисперсной порошковой смеси. Разработано комплексную обработку, которая заключалась в последовательной нитроцементации и борировании. Апроксимацией экспериментальных данных получены уравнения, которые позволяют прогнозировать толщину боридного слоя и коэффициент диффузии атомарного бора для легированной стали в диапазоне температур от 800 °С до 1000 °С при комплексной обработке. Новая технология позволяет сократить продолжительность насыщения атомарными элементами в 4-5 раз, что значительно уменьшает энергозатраты, получить необходимые эксплуатационные свойства и совмещать насыщения поверхностного слоя атомарным бором с закалкой.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, упрочнение инструмента, нитроцементация, борирование

SURFACE HARDENING OF TOOL FROM STEEL 38Cr2MoAl COMPLEX CHEMICAL-HEAT TREATMENT

К. КОСТЫК

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Chemical-thermal treatment, based on the surface saturation of alloys of different elements found wide use in industry. Achieved as a result of chemical-heat treatment changes the composition of the surface layers of the metal leads to a drastic change of their mechanical, physical, chemical, and physical properties (strength, toughness, wear resistance, corrosion resistance, heat resistance, magnetic properties, etc.). The aim of research work is to study the structure and properties of tool after thermo-chemical treatment in nanodisperse powder mixture. Experimental data showed that the thickness of the boride layer and the transition zone increases with increasing temperature of boriding from 800 °C to 1000 °C after carbonitriding at 550 °C. Surface microhardness confirms the presence of two borides, namely FeB with a hardness of 22 GPa and Fe₂B with hardness 18-16 GPa. The optimum mode of boriding in nanodisperse powder mixture for steel 38Cr2MoAl is the temperature of 950 °C a duration of 2 hours. At this temperature, a sufficient layer is formed borides (80 μm) with a smooth transition layer that forms a common diffusion layer to 200 μm. With increasing temperature of boriding in nanodisperse powder mixtures the diffusion coefficient of atomic boron is increased, which leads to intensive growth of the boride layer steel 38Cr2MoAl. The approximation of experimental data derived equations that predict the thickness of the boride layer and the diffusion coefficient of atomic boron alloyed steel in the temperature range from 800 °C up to 1000 °C in complex chemical-thermal treatment. New technology allows to reduce the duration of the saturation of the atomic elements in 4-5 times, which significantly reduces the energy consumption, to obtain the necessary performance characteristics and to combine the saturation of the surface layer of atomic boron with hardening.

Keywords: chemical heat treatment, hardening tool, carbonitriding, boriding

Вступ

Хіміко-термічною обробкою сталі називається така термічна обробка, яка виконується з метою зміни

хімічного складу та властивостей поверхневих шарів сталі. Ця зміна досягається в результаті взаємодії поверхні сталі з зовнішнім середовищем. Для створення такого середовища використовують тверді,

© К. О. КОСТИК, 2015

рідинні та газоподібні речовини, хімічних склад та властивості яких визначають зміну хімічного складу поверхневих шарів оброблюваного металу.

Результати хіміко-термічної обробки залежать, по-перше, від характеру взаємодії між сталлю та створеним зовнішнім середовищем, наслідком чого є збагачення або збіднення поверхні сталі різними елементами, та, по-друге, від швидкості переміщення атомів цих елементів від поверхні вглиб або з серцевини к поверхні сталі, тобто від швидкості дифузії [1–4].

Хіміко-термічна обробка, що заснована на поверхневому насиченні сплавів різними елементами, знайшла широке використання в промисловості: обробка, що заснована на поверхневому збідненні сплавів, в практиці використовується рідко (наприклад, відпал динамної сталі).

Одним з основних факторів, що визначають склад та глибину поверхневого дифузійного шару, є температура хіміко-термічної обробки, яка вибирається з рахунку отримання визначної (але не максимальної по ряду причин) швидкості протікання поверхневих реакцій та швидкості дифузії. Тривалість витримки при хіміко-термічної обробки є, так як і температура процесу, одним з вирішальних факторів, оскільки вона визначає глибину шару, в якому виникає зміна складу, та, звідси, властивостей металу.

Досягнута в результаті хіміко-термічної обробки зміна складу поверхневих шарів металу веде к різкій зміні їх механічних, фізико-хімічних та фізичних властивостей (міцності, в'язкості, зносостійкості, опір корозії, жаростійкості, магнітних властивостей та інше). Завдяки цьому підвищуються експлуатаційні властивості та подовжується строк служби виробів, що працюють в умовах зносу, навантажень, що викликають втому, в корозійностійких середовищах, в атмосфері гарячих газів і таке інше [5–8].

Залежно від фазового складу поверхневого шару, що утворюється в процесі хіміко-термічної обробки, різке відрізнєння властивостей цього шару від серцевини при одних процесах може бути досягнуто вже при повільному охолодженні після процесу (азотування легованої сталі, хромування високо вуглецевої сталі, алітування, сіліцування, обезвуглецювання марганцевої аустенітної сталі).

При використанні інших хіміко-термічних процесів різке відрізнєння властивостей від серцевини створюється тільки в результаті швидкого охолодження – загартування (цементация, високотемпературне ціанування).

Найбільш широке використання в промисловості отримав процес цементация та похідний від нього процес нітроцементация (насичення поверхневого шару сталі вуглецем, а нітро – азотом). Широке використання знайшли також процеси ціанування (одночасно насичення вуглецем та азотом), а також дифузійного цінкування та лужіння (створення на поверхні сталі покриттів з цинку або

олова, що зв'язані з основним металом проміжним дифузійним шаром).

Рідше використовуються процеси алітування (насичення алюмінієм), хромування (насичення хромом) та сіліцування (насичення кремнієм).

В теперішній час продовжується розробка деяких нових процесів [9–14].

Мета роботи

Метою науково-дослідної роботи є вивчення структури та властивостей інструменту після хіміко-термічної обробки у нанодисперсній порошковій суміші.

Результати досліджень

При визначенні структурного типу борованого шару, способу насичення та умов обробки використовується диференційний підхід к аналізу ряду факторів з метою отримання максимального ефекту від застосування процесу. Цей підхід для конкретного виду деталей або інструментів передбачає розгляд умов роботи деталі або інструменту, причин виходу з ладу, величини допустимого зношування, марки сталі та її термічної обробки, шорсткості робочих поверхонь, класу точності їх виготовлення, розміру та серійності.

З позиції умов роботи найбільш важливим вважається наявність ударного навантаження та високих питомих тисків, а також рівень температури. При наявності ударного навантаження доцільне використання пластичних однофазних борованих шарів, що були отримані в середньо температурному інтервалі, або композиційних шарів. Високі питомі тиски потребують твердої підкладки для боридного шару, яка забезпечуються подальшою після борування загартування підшару. Тому важливим фактором в цьому випадку є марка сталі підкладки, вміст вуглецю в підкладці та структура самої підкладки. В оптимальному стані вважається неприйнятним наявність в підкладці α – твердого розчину кремнію, алюмінію або нікелю. Робоча температура деталі або інструментів важлива з позиції забезпечення необхідної окислостійкості шляхом мікролегування боридів з метою отримання максимального ефекту.

При виході з ладу інструментів за причиною крихкого руйнування без істотного зношування в першу чергу причину треба шукати в їх конструкції або в якості металу. За наявності концентраторів напружень поверхневе борування повністю не вирішить проблему, що виникла. Деяке підвищення довговічності в цьому випадку може бути досягнуто за рахунок підвищеного вмісту вуглецю в підшарі, яке дозволяє знизити температуру нагрівання під загартування та отримати більш в'язку серцевину деталі. Це, в кінцевому випадку, зменшує ймовірність крихкого руйнування. В той же час при затупленні

ріжучих кромок інструментів різко збільшується збільшуються навантаження, які також викликають крихке руйнування. Пластичні однофазні боровані шари в цьому випадку запобігають гості кромки від швидкого затуплення.

Таким чином, навіть при крихкому руйнуванні інструментів без зміцнення використання борування вирішує проблему за умов правильного вибору технології зміцнення.

Максимальний ефект від використання борування забезпечується, коли величина допустимого зношування не перевищує товщини шару боридів. Але й при допустимому зношуванні, що складає 1-2 мм, строк служби інструменту значно збільшується за рахунок сумісної роботи борованого шару та підшару, які мають товщину до 1,5 мм. При правильному режимі термічної обробки підшар має більшу твердість, ніж серцевина інструмента.

Оптимальним варіантом зміцнення з позиції технології вважається суміщення процесу борування з одною з технологічних операцій термічної обробки, що використовується при виготовленні борованих інструментів, - використання низько-, середньо- або високолегованого борування.

При проведенні низькотемпературного борування зміни розмірів інструментів практично не спостерігається. Однак при цьому необхідно враховувати вихідну структуру сталі перед боруванням.

При проведенні процесів борування, що забезпечують утворення пластичних композиційних структур шарів (евтектичних, псевдоевтектичних або отриманих після комбінованої обробки), які мають значну товщину (до 1,5 мм) можлива кінцева механічна обробка борованих поверхонь деталей зі зняттям 0,1-0,3 мм. Таким чином, створюються умови чорнового та чистового шліфування робочих поверхонь після борування та доведення їх розмірів та шорсткості до величин, що відповідають кресленню.

Розмір деталі та серійність відповідають способу борування та його технологічним особливостям. Наприклад, зношувані ділянки поверхнею крупно габаритних інструментів доцільно

піддавати боруванню на твердих компактних матеріалах (обмазок, накладок, насичуючих моделей та ін.) з використанням місцевих видів нагрівання (СВЧ, лазерного, електронно-променевого).

Зміцненню піддають інструменти, що працюють у всіляких умовах: абразивного зношування, окислювального зношування, при високих питомих тисках та ударних навантаженнях, при знакозмінному напруженні, в агресивних середовищах та при різних сполученнях перерахованих та інших умовах.

Випробування інструментів, що працюють в різних умовах, після високотемпературного, середньотемпературного та низькотемпературного борування виявило підвищення міцності в 2 та більше разів.

Під час проведення промислових випробувань та промислового використання виявляються деякі ефекти та раниш не передбачені можливості. Наприклад, при випробуванні вирубних матриць відсічки облою в холодному стані був знайдений ефект самокатування ріжучої кромки. Ефект самозаточування виявлявся після зняття борованого шару на горизонтальній поверхні матриці за рахунок більш швидкого її зношування, та в подальшому більш швидкого зношування менш твердої структури металу підшару та основи на деякій відстані від ріжучої кромки.

Процес борування використовується в багатьох галузях промисловості. Правильний вибір способу та технології борування дозволяє охопити широкий спектр умов експлуатації деталей та інструментів, тертя без змашуючого матеріалу в повітрі та вакуумі, робота при низьких та високих температурах, в умовах абразивно-гідроабразивного та корозійно-механічного зношування, в контакті з розплавленими металами та солями [12-14].

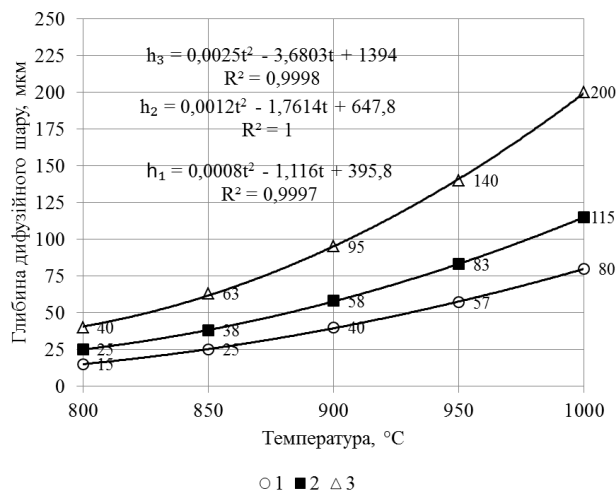
Зі сталі 38Х2МЮА виготовляють багато інструментів. У таблиці 1 вказані основні з них, їх властивості та застосування, також надані вимоги до цих інструментів.

Таблиця 1 – Інструменти зі сталі 38Х2МЮА

№ п/п	Назва інструменту	Загальний вид	Властивості та застосування	Вимоги до інструментів
1	Калібр-кільце різьбове		Для вимірювання різних видів різьби, що нанесена на вал. Може бути як двобічне, так й одnobічне, прохідними або непрохідними.	Висока точність виготовлення, найбільша жорсткість при найменшій вазі, постійність робочих розмірів в часі.
2	Набір шаблонів		Контроль кута скосу кромки, розмір притуплення, якість зборки під сварку. В готових зварних швах може здійснюватись перевірка ширини шву, величина катету зварного шва.	Стійкість до впливу агресивного середовища, здатність працювати як в приміщенні, так й в відкритому середовищі.

3	Нутромер індикаційний		Використовують для внутрішніх вимірів та точного визначення внутрішніх лінійних розмірів деталей: пазів, отворів. Для настроювання нутромеру на вимір потрібного розміру використовуються змінні стрижні.	Повинні мати ручку з матеріалу з малою теплопровідністю, зовнішні металеві поверхні повинні мати надійне антикорозійне покриття.
4	Шнек		Використовують, коли недопустима корозія елементів подавального обладнання а також, коли необхідно забезпечити чистоту подавального продукту від впливу факторів навколишнього середовища.	Повинен виготовлятися з міцного матеріалу, володіння антикорозійними властивостями.
5	Скоба		Використовують для вимірювання зовнішніх діаметрів. Володіє антикорозійними властивостями, тобто опором до зносу та корозії.	На скобах повинні бути проти ізольовані накладки, сферичні та плоскі поверхні п'яток скоб виготовляються з твердого сплаву.

За експериментальними даними отримано залежність товщини боридів від температури борування після нітроцементації для сталі 38Х2МЮА (рис. 1). Тривалість борування дорівнювала 120 хвилин, температура змінювалась від 800 до 1000 °С з шагом 50 °С.



- 1 ■ 2 △ 3
 1 – дифузійний шар боридів;
 2 – дифузійний шар карбонітридів;
 3 – загальний дифузійний шар

Рис. 1 – Залежність глибини дифузійного шару від температури

Товщина боридів з підвищенням температури збільшується (рис. 1) по формулі отриманої апроксимацією експериментальних даних поліномом другого ступеню:

$$h_1 = 0,0008t^2 - 1,116t + 395,8$$

з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9997$

де h – товщина боридів, мкм;

t – температура борування, °С

Мікротвердість підтверджує наявність двох боридів, а саме FeB з твердістю 22 ГПа і Fe₂B – 18 ГПа. Висока міцність бориду пояснюється складним типом зв'язку в цих з'єднаннях. Наявність єдиного 2р-електрона на зовнішній орбіті атома бору не тільки збільшує міцність зв'язку між атомами бору і металу, але і зумовлює наявність ковалентного зв'язку між атомами бору. Атоми бору зв'язані між собою в ланцюжки FeB [11].

Характер кривих (рис. 2) при температурах борування 800–900 °С вказує на різке зниження мікротвердості та невелике підвищення товщини загального дифузійного шару (від 40 до 95 мкм). При підвищенні температури (950 та 1000 °С) боридний шар збільшується до 57 та 80 мкм відповідно. Також, при цьому зростає карбонітридна перехідна зона до 83 та 115 мкм відповідно, що забезпечує плавний перехід від твердого боридного шару (22–20 ГПа) до серцевини з твердістю 5,7–5,8 ГПа.

Таким чином, оптимальним режимом борування для сталі 38Х2МЮА є температура 950 °С та тривалість 2 години. При такій температурі формується достатній шар боридів (до 80 мкм) з загальним дифузійним шаром до 200 мкм. Також для спрощення технологічного процесу пропонується поєднати борування з гартуванням для сталі 38Х2МЮА.

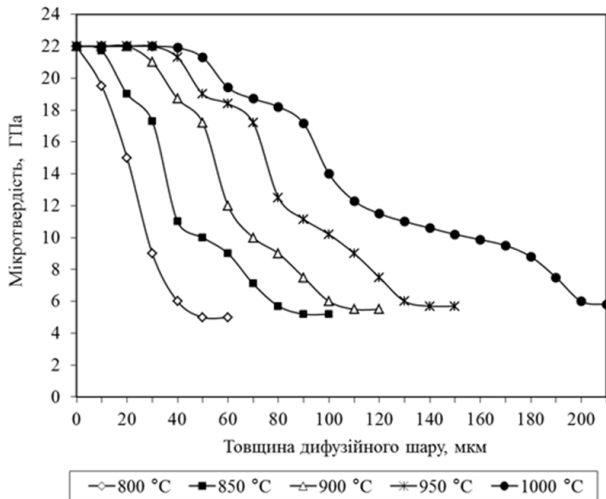


Рис. 2 – Розподіл мікротвердості в дифузійних шарах сталі 38X2МЮА після ХТО

Відомо, що для проведення поверхневого дифузійного насичення виробу необхідно створити направлений дифузійний потік атомів насичуючого елемента з поверхні в глибину виробу, що можливе за умови одночасного протікання трьох основних процесів:

- 1 утворення вільних атомів насичуючого елемента на поверхні виробу, що піддається дифузійному насиченню;
- 2 адсорбції (поглинання поверхнею) атомів насичуючого елемента виробом;
- 3 дифузії адсорбованих атомів в глибину виробу.

Найвірогіднішим і легко з'ясовним є вакансійний механізм. Відомо, що реальний кристал містить певне число вакантних вузлів решіток. Ці вакансії відкривають шлях для легкого здійснення дифузії. Елементарним стрибком при дифузії по цьому механізму служить перескок атома в сусідню вакансію. В результаті стрибка атом і вакансія просто обмінюються місцями.

Аналіз діаграми стану залізо-бор показав, що дифузійні шари на залізі легко формуються з хорошою відтворністю тими елементами, які на діаграмі стану утворюють явно виражену замкнуту γ -область поблизу температурної осі заліза. На рис. 3 приведений фрагмент діаграми стану Fe-B.

Виникнення фазового перетворення під дією зміни температури і концентрації бору в сталі пояснює голкоподібне зростання боридних дифузійних шарів на поверхні сталі.

Формування дифузійного шару можливе і у разі відсутності розчинності в результаті хімічної взаємодії атомів насичувального елемента (B) і основи (Fe) [12–14].

Тут дифузія пов'язана з утворенням нових фаз (хімічних з'єднань), що виникають в результаті реакцій, що відбуваються в твердій фазі. Така дифузія називається реакційною.

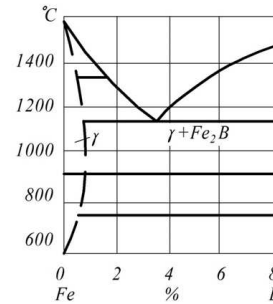


Рис. 3 – Фрагмент діаграми стану Fe-B

Коефіцієнт дифузії бору в загальному вигляді можна записати:

$$D_B = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

де R - газова постійна, Дж/моль · К

D_0 - коефіцієнт дифузії при нескінченно великій температурі, $\text{см}^2/\text{с}$;

Q - енергія, яку необхідно затрачувати в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній ґратці в інше, кал/г·атом.

Згідно даним температура залежність коефіцієнта дифузії бору в α - і γ -залізі описується наступними виразами:

$$D_B^\alpha = (7,9 \pm 2,3) \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{67 \pm 5}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с}.$$

$$D_B^\gamma = (5,7 \pm 1,8) \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{23 \pm 4}{RT}\right), \text{ см}^2/\text{с}.$$

Товщина борованого шару визначається по формулі:

$$h = \sqrt{2 \cdot D_B \cdot \tau}.$$

З формули 4.4, знаючи експериментальні дані товщини шару і варіюючи час нагріву при пічному нагріванні, можна знайти коефіцієнт дифузії бору для борування сталі 38X2МЮА:

$$D_B = \frac{h^2}{2 \cdot \tau},$$

$$D_B = 4 \cdot 10^{-6} t^3 - 0.0104 t^2 + 8.398 t - 2280.7,$$

де D_B – коефіцієнт дифузії бору, $\text{см}^2/\text{с}$;

t – температура борування, °C.

Результати розрахунків зміни коефіцієнта дифузії бору представлені на рис. 4. Для порівняння на рисунку нанесена крива D_γ теоретичних даних згідно отриманого рівняння. З рис. 4 видно, що зі збільшенням температури борування від 800 до

1000 °C коефіцієнт дифузії бору збільшується, що приводить до інтенсивного зростання борованого шару сталі 38X2МЮА.

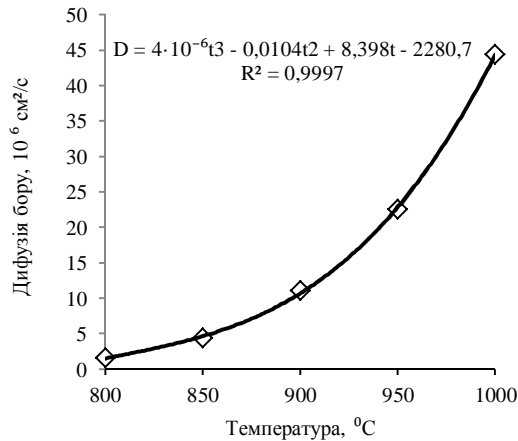


Рис. 4 – Залежність коефіцієнту дифузії бору від температури

Апроксимацією експериментальних даних отримано експоненціальне рівняння з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9997$, де R – це коефіцієнт кореляції, що дозволяє прогнозувати коефіцієнт дифузії борованого шару для сталі 38X2МЮА в діапазоні температур 800–1000 °C:

$$D_b = 4 \cdot 10^{-6} t^3 - 0.0104 t^2 + 8.398 t - 2280.7,$$

де D_b – коефіцієнт дифузії бору, $\text{см}^2/\text{с}$;
 t – температура борування, °C.

Загальною тенденцією впливу борованих шарів на механічні властивості сталей та сплавів вважається зниження межі міцності на 5-20 %, межі текучості на 5-10 %, відносного подовження на 20-50 %, відносного звуження в 1,5-3 рази та ударної в'язкості в 1,5-2 рази. Істотну роль в цьому впливі грає масштабний фактор, тобто відношення товщини шару к товщини або к діаметру зразку. При малому значенні масштабного фактору для двофазного борованого шару ($< 0,016$) цей вплив непомітний, а розкид визначених величин знаходиться в межі допуску. Це значення масштабного фактору відповідає товщини борованого шару $< 0,05$ мм для стандартних зразків. При значеннях масштабного фактору $> 0,016$ цей вплив вельми істотний. Для однофазного борованого шару граничне значення масштабного фактору складає 0,023.

При зміні навантаження борованих зразків змінюється поведінка борованого шару та його вплив на міцнісні характеристики борованих шарів. Наприклад, при крихкому руйнуванні матеріалу перехід від одноосного розтягнення к згину та стисканню супроводжується підвищенням міцнісних характеристик. Різниця зумовлена особливостями

зародження та розповсюдження тріщин в крихких матеріалах. Траєкторія руху тріщини та величина навантаження, що викликає перехід тріщини з рівноважної стадії в критичну, залежить від виду навантаження та визначають рівень навантаження, що призводить до завершення руйнування тіла.

При стисканні борованих зразків спостерігається підвищення межі міцності за рахунок високої межі міцності у самих боридів. При випробуванні на згин борованих зразків в розтягнутих волокнах борований шар знижує міцність, а в стиснутих – збільшує. Це призведе до зниження навантаження, що викликає руйнування, але в кінцевому разі підвищує опір згину за рахунок збільшення умовної межі текучості. Вплив масштабного фактору і в цьому випадку залишається таким же. При збільшенні навантаження вище межі пружності борований шар руйнується з утворенням на розтягнутому боці переважно тріщин, а на стиснутому боці – сколів. Після руйнування борованого шару починає руйнуватись пластична деформація в зоні підшару.

З підвищенням твердості серцевини умовна межа текучості борованої сталі підвищується в основному за рахунок більш високої міцності підшару порівняно з міцністю підкладки. Це також забезпечує і підвищений опір статичному згину. Ізотермічне загартування борованої сталі забезпечує отримання більш високої межі міцності, ніж безперервне охолодження при гартуванні в одному охолоджувачі.

При випробуваннях гладких зразків на втомну міцність виявлено, що однофазні боровані шари підвищують втомну міцність на 30-50 %, боровані шари зі структурою окремих ввімкнень фази FeV на поверхні підвищують на 10-30 %, а двофазні шари зі суцільною зоною фази FeV на поверхні підвищують на 10-20 %. Ці закономірності спостерігаються при товщині однофазного шару боридів не більш 170 мкм та двофазного шару – 130 мкм. При більших значеннях товщини шарів та при високому вмісті FeV в шарі (наприклад, до 70 % після електролізного насичення) спостерігається зниження втомної міцності.

Металографічні випробування показали, що при товщині шару боридів 90-100 мкм втомне руйнування починається під дифузійним шаром. На глибині 60-90 мкм від голок боридів к періоду, що відповідає 10-15 % довговічності, в зернах ферриту з'являються перші лінії зсувів. В подальшому спостерігається збільшення кількості зсувів, які скоплюються в окремих ділянках, а також розповсюдження зсувоутворення по довжині зразку (від місця закріплення к вільному кінцю) та по його перерізу як в бік борованого шару, так й к серцевині. Поступово лінії зсуву перетворюються в лінії разриву та мікротріщини. Розвиток мікротріщин в бік борованого шару виникає повільніше в 2 рази, ніж по напрямку к центру зразку. По досягненню зони боридів розповсюдження тріщини різко

прискорюється, що призводить до кінцевого руйнування зразку.

Таким чином, довговічність зразка визначається часом розповсюдження тріщини до борованого шару. Швидкість розповсюдження тріщини залежить від властивостей матеріалу підкладки. Структури підшару та від величини остаточних напружень стискання. Чим вище напруження стискання, тим менш швидкість розповсюдження тріщин. При товщині борованого шару, що більша за оптимальне значення, ймовірність утворення мікротріщин критичної величини істотно збільшується, а осередок руйнування наближується к борованому шару, тому межа втоми зменшується.

Зі збільшенням початкової товщини борованого шару осередок втомного руйнування наближується к поверхні, що безпосередньо зв'язано з характером розподілення остаточних напружень по товщині шару. З деякої величини товщини шару, що залежить від способу борування, фазового складу, швидкості охолодження та розподілення остаточних напружень, руйнування починається з поверхні зразка. В цьому випадку борований шар знижує втомну міцність порівняно з вихідним станом.

В двофазних борованих шарах, що містять більше 30 % фази FeV, навіть після повільного охолодження борованих сталей, виникають тріщини, що проникають на усю товщину борованого шару та розташовуються на поверхні деталі в вигляді сітки або окремих тріщин. Ці тріщини вважаються концентраторами напружень та готовими осередками втомного руйнування, яке починається з поверхні. Втомна міцність при цьому знижується.

Треба зауважити, що при інших видах навантаження утворена сітка тріщин, особливо при формуванні стискуючих напружень на поверхні, практично не впливає на довговічність роботи борованих деталей.

Подальше загартування з відпуском борованих сталей з двофазним шаром знижує межу втоми внаслідок утворення в борованому шарі великої кількості мікро- та макротріщин. Тому осередок втомного руйнування переміщується з перехідної зони на поверхню виробу. З підвищенням температури відпуску межа втоми борованої сталі збільшується на 20 %, але залишається знову нижче межі втоми сталі без покриття.

Боровані шари при температурі нагрівання до 800 °C підвищують опір окисленню в повітрі вуглецевих та низьколегованих сталей на протязі деякого часу. При цьому в шарах пропливає одночасно два процеси: окислення поверхні та розсмоктування (розчинення) шару. Окислення супроводжується утворенням окислів бору та заліза, які при температурах < 750 °C покривають поверхню суцільним шаром та захищають її на деякий час від впливу кисню повітря. Підвищення температури призводить до утворення краплин борного андігрида, оголення ділянок поверхні та прискоренню процесу

окислення. В кінцевому разі через 3-4 години на поверхні утворюється шар чистого заліза. Розсмоктування шару супроводжується зменшенням вмісту фази FeV та підвищенню загальної товщини шару боридів. При температурі 900 °C та витримці більш 6 годин боровані шари повністю руйнуються, не забезпечуючи захисту металу від окислення.

Присутність в середньовуглецевих сталях легованих елементів (Cr, Mn, Si, No, W) в кількості 1-2 % не вказує помітного впливу на кінетику окислення борованих шарів. Помітне зниження швидкості окислення спостерігається на високолегованих сталях або при додатковому легуванні шару з насичуючої суміші. Наприклад, легування двофазних борованих шарів марганцем підвищило його окалиностійкість в 2 рази.

Приймаючи до уваги обмеженість захисту металу від окислення борованими шарами, їх рідко використовують для підвищення окалиностійкості. Результати ж по окалиностійкості мають практичне значення при проведенні подальшої термічної обробки. В той же час в випадках роботи борованих сталей при підвищених температурах з одночасним механічним впливом забезпечується підвищення загальної тривалості їх роботи. Такі умови характерні для гарячештапного інструменту.

Таким чином, легування марганцем однофазних та двофазних борованих шарів, крім підвищення пластичності, підвищує розпалостійкість та окалиностійкість, що дозволяє рекомендувати ці шари до зміцнення штапкових інструментів гарячої та холодної обробки металів тиском.

Висновки

1. Експериментальні дані показали, що товщина боридного шару та перехідної зони збільшується з підвищенням температури борування від 800 °C до 1000 °C після нітроцементациї при 550 °C.

2. Поверхнева мікротвердість підтверджує наявність двох боридів, а саме FeV з твердістю 22 ГПа і Fe₂V з твердістю 18–16 ГПа.

3. Оптимальним режимом борування в нанодисперсній порошковій суміші для сталі 38X2MЮА є температура 950 °C тривалістю 2 години. При такій температурі формується достатній шар боридів (до 80 мкм) з плавним перехідним шаром, що формує загальний дифузійний шар до 200 мкм.

4. Зі збільшенням температури борування в нанодисперсній порошковій суміші коефіцієнт дифузії атомарного бору збільшується, що призводить до інтенсивного зростання боридного шару сталі 38X2MЮА.

5. Апроксимацією експериментальних даних отримані рівняння, які дозволяють прогнозувати товщину боридного шару та коефіцієнт дифузії атомарного бору для легованої сталі в діапазоні

температур від 800 °С до 1000 °С при комплексній ХТО.

6. Нова технологія дозволяє скоротити тривалість насичення атомарними елементами в 4–5 разів, що значно зменшує енергозатрати, отримати необхідні експлуатаційні властивості та суміщати насичення поверхневого шару атомарним бором із гартуванням.

Список літератури

1. **Тарасов, А. Н.** Высокотемпературная нитроцементация и низкотемпературное никотирование стали 16Х-ВИ для повышения износостойкости / **А. Н. Тарасов, А. Г. Нятин, П. Р. Шевченко** // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2007. – № 5. – С. 27–31.
2. **Петрова, Л. Г.** Внутреннее азотирование жаропрочных сталей и сплавов / **Л. Г. Петрова** // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2001. – № 1. – С. 10–17.
3. **Фунатани, К.** Низкотемпературное азотирование сталей в соляных ваннах / **К. Фунатани** // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. – № 7. – С. 12–17.
4. **Айрапетян, Н. А.** Повышение износостойкости конструкционных сталей с помощью низкотемпературного насыщения углеродом и азотом [Текст] / **Н. А. Айрапетян** // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 5. – С. 23–26.
5. **Fernandes, F. A. P.** Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel / **F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto et al.** // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2010. – Т. 40(2). – С. 175–179.
6. **Shu-Hung Yeh.** Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / **Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang** // *Engineering, Scientific Research Publishing*. – 2011. – Т. 9(3). – С. 942–948
7. **Ben Slima, S.** Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / **S. Ben Slima** // *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*. – 2012. – Т. 9(3). – С. 640–644
8. **Baranowska, J.** Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding / **Jolanta Baranowska** // *Material Science. – Lithuania*, 2005. – Т. 11(3). – С. 226–307.
9. **Fossati, A.** Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time / **A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto** [etc.] // *Surface and Coat. Technol.* – 2006. – Т. 200(11). – С. 3511–3517.
10. **Liu Junyou.** Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams / **Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjin** // *Appl. Surface Sci.* – 2005. 252. – № 4. – С. 921–928.
11. **Kulka, M.** The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides / **M. Kulka, A. Pertek, L. Klimek** // *Mater. Charact.* – 2006. – V. 56(3). – С. 232–240.
12. **Genel, K.** Kinetics of boriding of AISI W1 steel // **K. Genel, I. Ozbek, C. Bindal** // *Material Science and Engineering A*. – 2003. – V. 347(1–2). – С. 311–314.
13. **Stergioudis, G.** Formation of boride layers on steel substrates / **G. Stergioudis** // *Cryst. Res. And Technol.* – 2006. – V. 41(10). – С. 1002–1004.
14. **Sen Saduman.** An approach to kinetic study of borided steels / **Sen Saduman, Sen Ugur, Bindal Cuma** // *Surface and Coating Technologies*. – 2005. – V. 191(2–3). – С. 274–285.

References

1. **Tarasov, A. N., Nyatin, A. G., Shevchenko, P. R.** Vvisokotemperaturnaya nitrosetmentatsiya i nizkotemperaturnoe nikotirovanie stali 16H-VI dlya povysheniya iznosostoykosti. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2007, № 5, P. 27–31.
2. **Petrova L. G.** Vnutrennee azotirovanie zharoprochnykh staley i splavov. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2001, № 1, P. 10–17.
3. **Funatani, K.** Nizkotemperaturnoe azotirovanie staley v solyanykh vannah. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, № 7, P. 12–17.
4. **Ayrapetyan, N. A.** Povyshenie iznosostoykosti konstruktivnykh staley s pomoschyu nizkotemperaturnogo nasyischniya uglerodom i azotom. *Uprochnyayuschie tehnologii i pokryitiya*, 2005, № 5, P. 23–26.
5. **Fernandes, F. A. P., Heck, S. C., Pereira, R. G., A. ()** Lombardi-Neto, Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010, № 40(2), P. 175–179.
6. **Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang.** Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel. *Engineering, Scientific Research Publishing*, 2011, № 9(3), P. 942–948.
7. **Ben Slima, S.** Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 2012, № 9(3), P. 640–644.
8. **Baranowska, J.** Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding. *Material Science, Lithuania*, 2005, № 11(3), P. 226–307.
9. **Fossati, A., Borgioli, F., Galvanetto, E.** Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time. *Surface and Coat. Technol.*, 2006, № 200(11), P. 3511–3517.
10. **Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjin.** Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams. – *Appl. Surface Sci.*, 2005, № 4, P. 921–928.
11. **Kulka, M., Pertek, A., L. Klimek, M.** (2006) The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides. *Mater. Charact.*, №56(3), P. 232–240.
12. **Genel, K., Ozbek, I., Bindal, C.** (2003) Kinetics of boriding of AISI W1 steel. *Material Science and Engineering A*, № 347(1–2), P. 311–314.
13. **Stergioudis G.** (2006) Formation of boride layers on steel substrates. *Cryst. Res. And Technol.*, №41(10), P.1002–1004.
14. **Sen Saduman, Sen Ugur, Bindal Cuma** (2005) An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and Coating Technologies*, № 191(2–3), P. 274–285.

Надійшло (received) 15.06.2015

УДК 629.124, 614.84

АНАЛІЗ ВИМОГ, ЩО ПРЕД'ЯВЛЯЮТЬСЯ ДО ПОЖЕЖНИХ СУДЕН

В. С. КРОПИВНИЦЬКИЙ

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Проаналізовано вітчизняний та іноземний досвід проектування рятувальних і пожежних судів, наведені систематизовані дані та рекомендації з основних розділів проектування. Наведено вимог до розмірів конструктивних елементів пожежно-рятувальних катерів, що забезпечують для пожежних: зручність і безпеку посадки в катер по тривозі; необхідну маневреність, непотоплюваність, енергоозброєність; зручність роботи з протипожежним устаткуванням, розміщеним у відсіках катерів, при ліквідації надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: Пожежно-рятувальний катер, вимоги та характеристики аварійно рятувальних човнів.

АННОТАЦИЯ Проанализировано отечественный и иностранный опыт проектирования спасательных и пожарных судов, приведены систематизированные данные и рекомендации по основным разделам проектирования. Приведены требования к размерам конструктивных элементов пожарно-спасательных катеров, обеспечивающих для пожарных: удобство и безопасность посадки в катер по тревоге; необходимую маневренность, непотопляемость, энерговооруженность; удобство работы с противопожарным оборудованием, размещенным в отсеках катеров, при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: Пожарно-спасательный катер, требования и характеристики аварийно-спасательных лодок.

AN ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS FOR FIRE AND RESCUE CRAFTS

V. KROPYVNYTSKYI

Ukrainian Research Institute of Civil Protection, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Domestic and foreign experience in a designing of the rescue and firefighting ships is analysed. General recommendations on the main structural units of the rescue ship construction and systematization of the engineering and functional requirements as well as main technical specifications have been collected and discussed. Small-size high-speed vessels and boats are designed and built as a multi-purpose ships, which have a lot of of structural differences from another and from the big ships because their design aimed on the solution of the specific tasks.

The main trend in the development of small craft are in use an engines with large redundant power capacity that makes possibility to achieve higher velocities of boat movement and also leads to high specific power of a whole craft. In addition to the power requirements some other functional peculiarities should be realized in the rescue crafts. These requirements imposed the size and shape of the structural elements of fire and rescue crafts, providing for firefighters: convenience and safety of the craft boarding; its mobility, unsinkable and the usability of the fire-fighting and emergency equipment. In the paper detailed analysis of these requirements are described. The dependence of the fire and rescue craft length on their tonnage and power has been presented for the models available in practice.

The work presents a structured specification of the technical requirements for the fire and rescue crafts that will satisfy peculiarities of emergency rescue actions which must be organized from the rivers and lakes in Ukraine.

Keywords: Fire-rescue craft, requirements and performance characteristics of the rescue ships.

Ведення

У зв'язку з розвитком берегової інфраструктури все більш актуальною стає завдання забезпечення вітчизняного малого флоту спеціалізованими робочими судами, в першу чергу тими, що здатні оперативно прийти на допомогу всім, хто потребує допомоги при виникненні надзвичайних ситуацій (НС) на зазначених об'єктах. Ці НС пов'язані з виникненням пожеж та інших можливих техногенних аварій і катастроф, для ліквідації яких розробляється ряд сучасних інноваційних технічних комплексів, серед яких слід відмітити пожежно-рятувальний катер UMS-1000. Але у прибережних містах аварійно-рятувальні підрозділи не можуть

похвалитися наявністю флоту «швидкого реагування».

В даний час рятувальні служби більшості країн мають у своєму складі як універсальні, так і спеціалізовані рятувальні судна. Універсальні судна, які здатні виконувати однаково ефективно всі типові роботи, мають, як правило, велику водотоннажність, а також високу вартість будівництва та експлуатації. Тому останнім часом характерно переважне будівництво спеціалізованих судів [1-3]. Однак маломірних пожежних судів у світовій практиці немає. Першими подібне судно розробили і побудували українські суднобудівники на підприємстві «УМС-БОТ» у місті Києві [4, 5].

Малі швидкохідні судна та катери проектується і будуються, як судна багатопільового

призначення і є важливою складовою частиною флоту, що має велику специфіку у вирішенні проектних питань.

Одна з відмінностей малих суден і катерів від звичайних водовитісняючих судів пов'язано з питаннями функціонального використання. Основні тенденції розвитку малих суден полягають у досягненні високих швидкостей за допомогою значних потужних потенціалів, що в свою чергу веде до високої енергоозброєності. Відповідно, модель проектування швидкохідних катерів є прикладом однієї з найскладніших логіко-математичних моделей, у зв'язку з тим, що в оптимізаційній системі для малих суден і катерів можна виділити кілька домінуючих функціональних підсистем.

Ціль роботи

Аналіз існуючих конструкцій пожежних катерів показав, що дані катери обладнуються одним або декількома високопродуктивними (до 140 л/с) насосами, що подають воду в стаціонарні лафетні стволи або в рукавні лінії. Насоси мають привід від спеціальних або ходових двигунів катери і встановлюються нижче конструктивної ватерлінії, що забезпечує швидке заповнення насосів водою самопливом. Лафетні стволи, як правило, встановлюються на носі, кормі і надбудові і забезпечують довжину (виліт) струменя до 100 м. На деяких катерах є телескопічні вишки і стріли, так само обладнані пожежними стволами. Водотоннажність річкових пожежних катерів від 7 до 25 т, при максимальній швидкості до 45 вузлів [6].

Ліквідація НС відбувається в екстремальних умовах, що становлять загрозу життя і здоров'я для рятувальників, при гострому дефіциті часу. З одного боку, діють небезпечні фактори НС, з іншого - людина і створена ним техніка для боротьби з надзвичайними ситуаціями та їх наслідками.

Випадковий час виклику на НС вимагає високої готовності рятувальників до виконання завдань з ліквідації НС у будь-який час доби. Розрахунки рятувальників складно формувати з людей однакового зросту і комплекції, отже, пожежно-рятувальні катери (ПРК) повинні бути пристосовані до використання їх рятувальниками різного зросту. По прибуттю до місця НС рятувальникам необхідно в мінімально короткий час підготувати пожежно-рятувальне обладнання до роботи і почати її ліквідацію.

З особливостей розвитку та ліквідації НС різного характеру та збитку якого завдає НС, можна зробити висновок, що виконання таких дій як виїзд пожежно-рятувальних підрозділів по сигналу тривоги, слідування до місця НС, розгортання пожежно-рятувального обладнання повинно проводитися в дуже стислі терміни. Досягнення цього обумовлюється: високими показниками тактико-технічних характеристик ПРК та пожежного

обладнання (ПО); ступенем досконалості підготовки рятувальників; пристосованістю пожежно-рятувальних катерів до роботи екіпажу та рятувальників. Велике значення має кваліфікація керівного складу, який бере безпосередню участь у ліквідації НС.

Пожежно-рятувальні катери, як засоби механізації ліквідації НС, повинні перебувати в постійній готовності до їх негайного використання, завжди бути в технічно справному стані, слідувати до місця виникнення НС, починаючи з моменту виклику з максимально можливою швидкістю.

Для виконання завдань з підготовки до ліквідації НС в мінімальний час необхідно, щоб ПРК були, як можна краще пристосовані до роботи на них рятувальників. Поліпшення пристосованості ПРК до дій рятувальників дозволить не тільки підвищити ефективність їх використання при ліквідації НС та їх наслідків, а й є одним із шляхів щодо вдосконалення і розвитку протипожежної та аварійно-рятувальної техніки.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю обґрунтування вимог до розмірів конструктивних елементів ПРК, що забезпечують для рятувальників різного зросту: зручність і безпеку посадки в катер за сигналом тривоги; зручність займаної пози рятувальниками в каюті-салоні розрахунку при прямуванні до місця виклику; зручність роботи з ПО, розміщеним у відсіках ПРК, при підготовці його до використання за призначенням, тобто при ліквідації НС.

Отримані значення розмірів конструктивних елементів ПРК повинні бути зручними для рятувальників як низького, так і високого зросту.

Вивчення пристосованості ПРК до роботи рятувальників є одним із шляхів підвищення готовності пожежно-рятувальних підрозділів до виконання ними завдань за призначенням людей і ліквідації надзвичайних ситуацій та їх наслідків, полегшення умов праці рятувальників. Зрештою - це один з найважливіших заходів, реалізація якого сприятиме мінімізації часу, від отримання повідомлення про НС до початку її ліквідації, зменшуючи тим самим кількість жертв та знижуючи збиток від НС.

Обговорення результатів

Вимоги, що пред'являються до пожежних судам визначаються основною функцією цих судів - роботою в акваторії порту і прибережній зоні, а також, у виняткових випадках, на зовнішньому рейді.

Як і рятувальні, пожежні судна незалежно від зайнятості (відстій, буксирування і т.ін.) Завжди повинні бути готові негайно вирушити до місця виникнення надзвичайної ситуації. Незважаючи на те, що відстані в сфері обслуговування пожежного судна порівняно невеликі, пожежні судна для швидкого прибуття до місця виникнення пожежі повинні мати

відносно великою швидкістю ходу. При її визначенні слід враховувати течії в акваторіях портів і рейдів, необхідність частого маневрування в узкостях і т.ін. До маневреності пожежних судів пред'являються дуже високі вимоги. Це пояснюється необхідністю швидких і частих реверсів, поворотів, змін ходу в умовах обмеженої акваторії і швидких маневрів при гасінні пожеж і ліквідації НС, коли кілька хвилин зволікання можуть не тільки негативно позначитися на результатах протипожежних операцій, а й поставити під загрозу безпеку самого пожежного судна. Практично маневрові якості пожежних суден повинні бути такими ж, якщо не вище, ніж у буксирів-кантувальників. Це також впливає і на розміри пожежних судів.

При гасінні пожеж неприпустимі зволікання в роботі головного двигуна і при введенні в дію протипожежних установок. Тому до пожежних суден обов'язково висувають вимогу централізованого управління як головним двигуном, так і основним протипожежним обладнанням. Залежно від типу судна управління може здійснюватися або з центрального поста, або з рульової рубки.

Пожежні судна повинні бути обладнані потужними протипожежними засобами. Одночасно вони обладнаються і водовідливними засобами, оскільки при проведенні протипожежних операцій нерідкі випадки затоплення відсіків аварійного судна. Потужність і оснащення протипожежними засобами може бути різною, це визначається залежно від обслуговуваних ними портів і територій, довжини їх причалів, кількості та характеру вантажів, що переробляються в портах, від суднообігу портів, тоннажу і розмірів обслуговуваних судів, характеристики забудови прибережної території.

Часті суперечки викликає питання: якими повинні бути допоміжні функції пожежних судів. Досвід проектування і експлуатації показує, що такі функції пожежного судна, як можливість тривалого буксирування або зняття аварійного судна з мілини, обслуговування підводних робіт, призводять до різкого збільшення розмірності судна і наближають його по конструкції до рятувального судна, добре обладнаному в протипожежному відношенні. Використання судів великих розмірностей в обмежених умовах портів та прибережної зони річок і внутрішніх водойм малоефективне і не завжди можливо. Очевидно, доцільно обмежити допоміжні функції пожежних судів, оскільки в портах ці функції з успіхом можуть виконати буксири, водолазні боти і інші судна [7, 8].

Для більшої ефективності гасіння пожежне судно повинне підходити як можливо ближче до палаючих об'єктів. При пожежогасінні берегових об'єктів в портах це особливо важливо і зумовлює обмеження осадки пожежних суден. Для захисту пожежних-рятувальників суден від вогню, на них передбачають систему водяної завіси.

Особливості експлуатації пожежних суден спричиняють необхідність обладнання їх підрулюючими пристроями, зумовлюють незвичайне конструктивне виконання деяких судових пристроїв і створення спеціальних пристосувань для встановлення лафетних стволів, висадки десантів пожежних на аварійне судно і т.ін.

На відміну від проектування транспортних судів, для яких досить відомі вихідні умови (вантажопідйомність, швидкість ходу, пасажиромісткість і т.ін.), При виборі головних розмірностей рятувальних і пожежних судів проєктант, як правило, змушений з самого початку вирішувати задачу з багатьма невідомими. Головні розмірності можуть бути визначені, уточнені, а оптимальні величини встановлені методом послідовних наближень і по заданим параметрам (осадка, остійність і т.ін.).

Існують різні точки зору про основні вихідні параметри для проектування рятувальних і пожежних суден. Однак є підстави стверджувати, що основним вихідним параметром для суден розглянутих типів має бути потужність енергетичної установки, від величини якої, в кінцевому рахунку, залежить швидкість ходу, здатність забезпечити буксирування або утримування аварійного судна, можливість одночасної роботи всіма протипожежними засобами при збереженні достатнього ходу судна і т.д.

При визначенні розмірностей рятувальних і пожежних судів враховують необхідність розміщення та компонування судових приміщень і спеціального обладнання, а також надання судну відповідних маневрених і морехідних якостей. На перших етапах вибору головних розмірностей корисно скористатися результатами аналізу статистичних залежностей за побудованими судами розглянутих типів. У подальшому розмірностей судна підлягають уточненню з розрахунковою перевіркою всіх його характеристик.

Перш ніж перейти безпосередньо до питання про вибір головних розмірностей, необхідно розглянути деякі вихідні фактори, що визначають розміри судів рятувального та пожежного класів. Одним з таких факторів є вибір автономності плавання.

Існує думка, що на спеціалізованих пожежних судах необхідно передбачати запаси палива, що забезпечують безперерйну роботу всіх механізмів на повну потужність протягом 30 год. Для уточнення даного питання цікаво виявити вплив автономності пожежного судна на його розмірності і швидкість ходу. На графіку рис. 1 швидкість ходу v одного з пожежних суден, його водотоннажність D і довжина L виражені у функції від автономності n . У середньому зі збільшенням автономності на добу швидкість ходу знижується на 0,3 вузла (при постійній потужності енергетичної установки), довжина судна зростає приблизно на 1- 1,2 м, а водотоннажність - на 35-40 т [7].

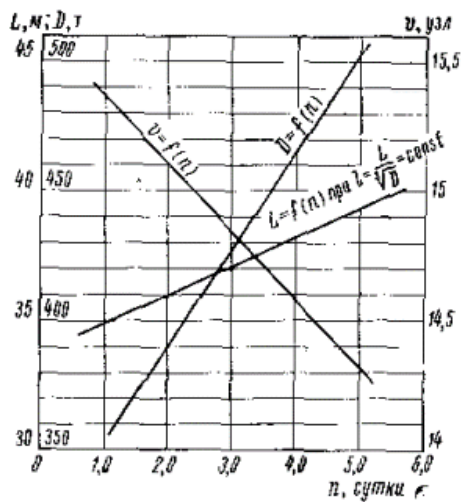


Рис. 1 – Залежність розмірностей пожежного судна і його швидкості ходу від автономності плавання.

Автономність залежить від умов експлуатації пожежного судна і, зокрема, від граничних відстаней можливих пробігів по акваторії порту і рейдів і т. п. Вважаючи, що швидкість ходу судна повинна бути близько 15 вузлів, можна рекомендувати автономність дві доби. Це дозволить не тільки зберегти прийнятні для експлуатації в портах розміри судна, але і зменшити його будівельну вартість.

Пожежні катера, як правило, не залишають акваторію портів. Зважаючи на малі розмірності, що не дозволяють їм мати великі запаси палива, масла і прісної води, для цих суден прийнятна автономність близько трьох діб.

Враховуючи необхідність постійної готовності пожежного судна до виконання своїх основних функцій по гасінню пожеж та рятуванню, на його борту, крім екіпажу, завжди повинна знаходитися пожежно-десантна партія.

Головні розмірності судів рятувального та пожежного класів, а також їх співвідношення всередині цих класів розрізняються залежно від типу судна і потужності енергетичної установки.

Основними критеріями оцінки судна служать його технічні характеристики. Найменша довжина сприятливо позначається на підвищенні маневрених якостей суден, їх ефективності при роботі в обмежених акваторіях портів, у вузьких проходах, звивистих фарватерах. Однак при виборі довжини за умовами непотоплюваності в окремих випадках буває необхідно деяке збільшення довжини судна в порівнянні з оптимальною.

Всі типи пожежних судів поділені на чотири групи: портові буксири, забезпечені протипожежним обладнанням для допомоги іншим суднам, пожежні буксири, спеціалізовані пожежні судна і пожежні катери. Цей поділ викликано сформованою практикою будівництва та експлуатації портових судів. Різниця між портовими і пожежними

буксирами полягає в тому, що перші мають протипожежні засоби, які не є основним обладнанням судна. Їх потужність невелика, спеціальні пожежні насоси відсутні, для гасіння пожежі на аварійному судні в основному використовуються пожежні насоси буксира. Пожежні буксири, як правило, мають спеціальні пожежні насоси для надання допомоги аварійним судам і досить розгалужену систему лафетного гасіння. Протипожежні можливості цих буксирів встановлюють у процесі їх проектування, вважаючи, що протипожежні якості повинні бути основною (після буксирування) функцією судна.

На відміну від рятувальних суден, у яких із зростанням потужності силової установки закономірно змінюється співвідношення головних розмірів судів, у класі пожежних судів такий закономірності не спостерігається.

Багато пожежних суден і катерів, які є портовими, відрізняються за співвідношенням розмірностей від пожежних і портових буксирів. Це пояснюється насамперед тим, що для таких суден основні характеристики - швидкість ходу і висока насиченість протипожежним устаткуванням, зумовлюють необхідність значних обсягів і площ як на палубі, так і в приміщеннях судна.

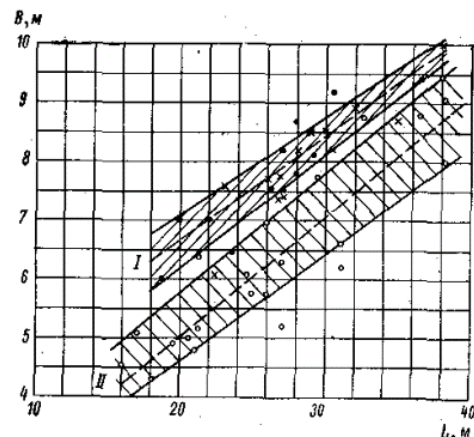


Рис. 2 – Залежність ширини судів пожежного класу від їх довжини. I - пожежні буксири і портові буксири з протипожежним устаткуванням; II - пожежні судна і катери.

З графіка на рис. 2, де цифрою I позначена залежність ширини B від довжини L пожежних буксирів і портових буксирів із протипожежним устаткуванням, а цифрою II та ж залежність для пожежних суден і катерів, видно: ставлення L/B у перших значно менше, ніж у другій. Середні значення L/B становлять відповідно 3,4 - 3,5 і 4,2 - 4,3, причому зі збільшенням довжини суден відношення збільшується, що пояснюється для всіх розглянутих судів впливом потужності енергетичної установки на їх швидкість.

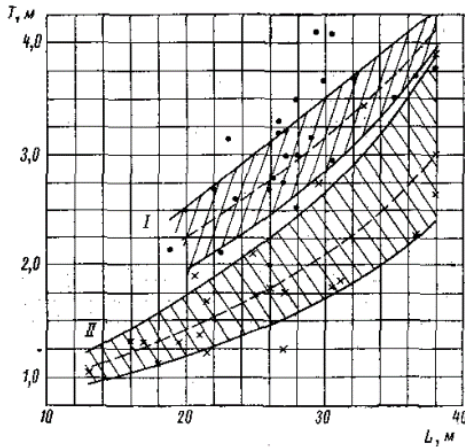


Рис. 3 – Взаємозалежність довжини і осадки суден пожежного класу. I - пожежні буксири і портові буксири з протипожежним устаткуванням; II - пожежні судна і катери.

Аналогічна зміна кривих відносин L / T , різне для категорій суден I і II, представлено на рис. 3. Слід мати на увазі, що при рівних довжинах, осадки спеціальних пожежних судів і катерів менше, ніж осадки пожежних і портових буксирів. Прагнення до зменшення осадки диктується необхідністю використання пожежних судів біля причалів берегової лінії з тим, щоб забезпечити гасіння пожеж не тільки на судах, але і берегових споруд.

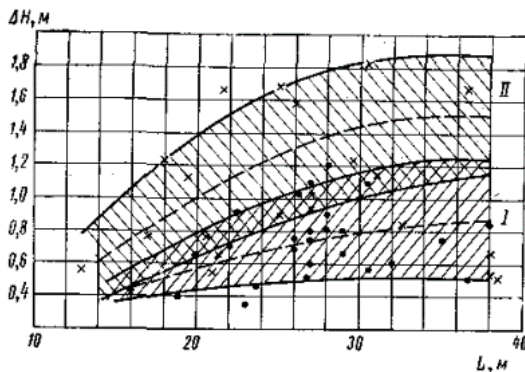


Рис. 4 – Взаємозалежність довжини суден пожежного класу і висоти надводного борту. I - пожежні буксири і портові буксири з протипожежним устаткуванням; II - пожежні судна і катери.

У той же час осадка портових та пожежних буксирів підпорядкована в першу чергу вимозі отримання високих тягових характеристик. Тому середні значення відносини B / T для пожежних суден і катерів складають 3,2 - 3,4, а для портових і пожежних буксирів 2,6 - 2,7, причому відношення зменшується зі збільшенням довжини суден. На величину відносини B / T впливають також і вимоги забезпечення належної остійності.

Характерна різниця у відносинах H/T для суден категорій I і II. На рис. 4 показані криві, зміни висоти

надводного борту ΔH залежно від L . За інших рівних умов величина надводного борту біля пожежних судів і катерів більше, ніж у портових та пожежних буксирів тих же розмірів. Середні значення ΔH у перших 0,6 - 1,5 м, у других 0,4 - 0,8 м. Враховуючи менші опади, характерні для пожежних суден і катерів, середні відносини H/T для них складають 1,7 - 1,8, в той час як у пожежників і портових буксирів це відношення значно менше (1,2 - 1,3).

Криві залежності довжини суден L від потужності енергетичної установки N_e , систематизовані на рис. 5 (як і раніше, крива I для комбінованих пожежних судів і крива II для спеціалізованих), показують, що при рівній потужності довжини пожежних суден і катерів вибираються більші, ніж пожежних і портових буксирів. Оскільки для судів пожежного класу потужність енергетичної установки не завжди характеризує ступінь «пожежної потужності» судна, деякі зарубіжні проектувальники [9-11] при визначенні довжини судна виходять із загальної продуктивності пожежних насосів, вважаючи, що ця вихідна величина більш повно відображає насиченість судна обладнанням та тим самим регламентує його розмірності. Очевидно, такий спосіб може бути в якійсь мірі застосовний до спеціалізованих пожежних суден і катерів, але навряд чи їм можна скористатися для судів комбінованих типів.

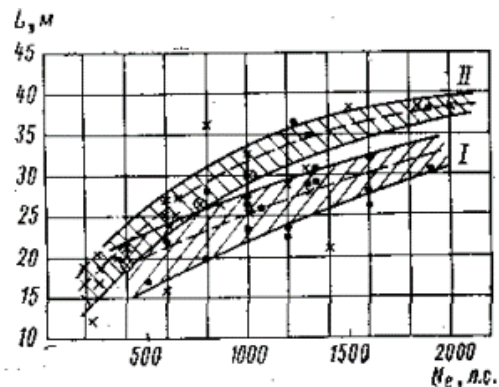


Рис. 5 – Залежність довжини суден пожежного класу від потужності їх енергетичної установки. I - пожежні буксири і портові буксири з протипожежним устаткуванням; II - пожежні судна і катери; ⊗ - точки за рекомендацією довідкової літератури.

Усереднена крива залежності довжини судна L від продуктивності пожежних насосів Q побудована на рис. 6 для ряду пожежних суден і катерів. З рисунка видно, що розкид точок досить значний. Однак якщо при проектуванні пожежного судна обговорена необхідна потужність пожежних насосів, то кривої на рис. 6 можна скористатися в першому наближенні для попередньої оцінки довжини судна і відповідно його решти розмірностей за вищенаведеними співвідношеннями L / B , B / T і H / T .

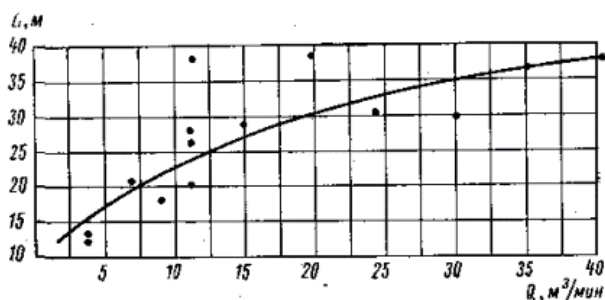


Рис. 6 – Залежність довжини пожежних судів від продуктивності пожежних насосів.

Найбільш поширений тип рушія, що використовується на рятувальних і пожежних судах, - гребний гвинт. При проектуванні судна на вибір числа рушіїв впливає наявність головного двигуна необхідної потужності. Зосередження всієї необхідної потужності в одному агрегаті завжди доцільніше, ніж дроблення її на два двигуни, - щодо простоти, зручності обслуговування і ремонту і багатьох інших експлуатаційних умов. Тому якщо можна вибрати один з двох варіантів (один двигун, що працює на один гвинт, або два двигуни тієї ж сумарної потужності, що працюють на два гвинти), майже завжди віддають перевагу першому варіанту. Лише в умовах обмеженої осадки, коли велике навантаження, що припадає на гребний гвинт обмеженого діаметра, призводить до різкого зниження його ККД, Виникає необхідність застосування двогвинтової установки.

Спеціалізовані пожежні судна найчастіше є двогвинтовими. Крім обмежень осадки, більш характерних для пожежних суден, ніж для рятувальних, пред'являються підвищені вимоги до поворотності пожежних судів.

На загальне компонування судів пожежного класу істотно впливають такі вихідні фактори, як автономність плавання і комплектація екіпажу, не кажучи вже про особливості архітектурного типу суден, які на відміну від судів рятувального класу вельми різноманітні, оскільки сам клас пожежних судів більш різнотипний. Компонування пожежних катерів специфічна в силу їх малих розмірностей. Схема відсіків проста, тому що корпус катерів розділений, як правило, трьома поперечними перегородками на чотири відсіки: форпик, житловий відсік, машинне відділення і ахтерпик.

На відміну від портових буксирних катерів, машинне відділення пожежних катерів зазвичай має велику довжину для можливості розміщення в ньому, крім звичайних головних і допоміжних двигунів, також пожежних насосів і цистерни з піноутворювачем. Невелика рубка на верхній палубі служить для розміщення рульової і агрегатних. Допоміжний буксирний пристрій передбачається вельми досить рідко, щоб не захарашувати кормову верхню палубу. Лафетні стволи зазвичай розміщуються в носі перед рульовою рубкою, на даху рульової рубки і в кормовій частині верхньої палуби.

Всього зазвичай встановлюють від одного до чотирьох пожежних лафетних стволів. Не виключена установка одного з лафетних стволів на телескопічній чи стаціонарній вежі або щоглі.

Сучасні пожежно-рятувальні судна обладнуються потужними протипожежними засобами. До них відносяться різні протипожежні судові системи, а також протипожежне обладнання, засоби захисту особового складу та технічне допоміжне протипожежне обладнання.

Маломірне пожежне судно «УМС-1000» має такі технічні характеристики. Довжина 10,6 м, ширина 3,2 м, осадка 0,56 м, водотоннажність 7 тон, максимальна швидкість ходу 45 вузлів, екіпаж 2 людини - судноводій і механік, а також передбачено 8 посадочних місць для пожежників, рятувальників або потерпілих. Рятувальний катер здатний брати на борт близько 500 кг різних вантажів, при цьому, не виводячи з ладу штатного обладнання. Пожежно-рятувальний катер «УМС-1000» оснащений двома дизельними моторами потужністю 330 к.с.

Перевагою даної моделі катера є практична непотоплюваність і великий запас плавучості, за рахунок високої швидкості відкачки заборотної води з пошкоджених відсіків. Це забезпечують чотири автономні насосні установки.

Проблемою при проектуванні та виготовлення пожежно-рятувального катера було поєднати в малих габаритах судна повний комплект необхідний для виконання призначених функцій. При цьому комплект обладнання не повинен поступатися тому, яким оснащують наземний пожежний транспорт. При створенні пожежного транспорту продумують кожну деталь, проте найпотужнішим оснащенням для гасіння пожеж є лафетні стволи - стаціонарне пристрій, що подає велику кількість води зі швидкістю 100 л/с і тиску 14 атмосфер. Струмінь має дальність до 100 метрів. Крім того лафетні стволи здатні створити захисний екран або водяну завісу. Це дрібнодисперсне розпорошення захищає екіпаж і корпус судна, що знаходиться в безпосередній близькості від палаючого об'єкта. В даному випадку на катері «УМС-1000» є два стаціонарних лафетних ствола, а також потужний насос, який працює як насосна станція, що подає 100 л/с води на відстань до 2 км, забезпечуючи при цьому роботу шести пожежних стволів. Імпульс від струменя або течії пожежний катер компенсує за рахунок системи позиціонування приводу, залишаючись на одному місці з точністю до 0,5 м.

Однак особливим пожежно-рятувальний катер робить не тільки устаткування. За деякими спостереженнями інші виробники не виготовляли катер з компонуванням прохідний рубки, щоб можна безперешкодно пройти з корми на ніс і назад. А це дуже важливо в разі проведення рятувальних операцій. Прохідна рубка на пожежному катері «УМС-1000» дуже зручна при вивантаженні бойового екіпажу під час гасіння осередку пожежі, при

винесенні постраждалих, не потрібно йти по тонкому борту зліва чи справа. Крім того в катері даного проекту застосовуються два двигуни, які використовуються для руху і для водяних насосів, що здійснюють подачу води. На початку роботи для пожежогасіння системи одні з двигунів переключаться з управління гребним гвинтом на роботу з водяним насосом, який здійснює подачу води. Це дало можливість зробити судно більш легким, економічним, компактним і досить маневреним.

Пожежно-рятувальний катер спроектований з можливістю гасіння пожеж на водних об'єктах і спорудах, розташованих поряд з водою на відстані до 100 метрів у внутрішніх акваторіях порту. За допомогою даного катера можна рятувати людей на воді, і застосовувати плавзасіб, як водолазну базу. Для цього пожежно-рятувальний катер «УМС-1000» обладнаний трьома комплектами обладнання для порятунку на воді. Катер оснащений медичним обладнанням і різними засобами зв'язку.

Висновки

Визначені вище технологічні, експлуатаційні та ергономічні вимоги доцільно використовувати при математичному та комп'ютерному моделюванні, для створення оптимальної схеми розміщення пожежно-рятувального обладнання та спорядження на борту катера базової конструкції, що дозволить створити модель малого річкового пожежно-рятувального катера з розширеними тактичними можливостями, враховуючи перспективу експлуатацію на водних об'єктах з малими глибинами.

Список літератури

1. Справочник спасателя. Книга 8. Надводные и подводные спасательные работы. – М.; ФЦ ВНИИ ГОЧС. – 2006. – 204 с.
2. Planas-Cuchi, Eulalia., Casal, Joaquim., Lancia, Antonio., and Bordignon, Leo., "Protection of Equipment Engulfed in a Pool Fire" *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*. – № 3, Volume 9. – 1996.
3. Leblanc, D. Fire environments typical of navy ships : дис. – Worcester Polytechnic Institute. – 1998.
4. Ковалев, А. А. Увеличение маневренности пожарного катера с использованием пожарного насоса как элемента подруливающей системы / А. А. Ковалев, С. В. Васильев, В. С. Кропивницкий // *Збірка наукових праць. Проблеми пожежної безпеки*. Вип. 35 – Х.: НУЦЗУ. – 2014. – С. 100-105.
5. Ковалев, А. А. Тактико-технические требования к конструкции пожарного катера / А. А. Ковалев, В. С. Кропивницкий // *Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* Гомель, 22–23 мая 2014 г. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2014. – С. 218-219.
6. Борисов, Н. Н. Проектирование и техническая эксплуатация СВЭО / Н. Н. Борисов, Н. А. Пономарёв, С. Г. Яковлев // Н.Новгород: ВГАВТ. – 1997.

7. Гурович, А. Н., Проектирование спасательных и пожарных судов / А. Н. Гурович, А. А. Родионов // – Л.: Судостроение. – 1971. – 283 с.
8. Грамузов, Е. М. Определение основных характеристик спасательного судна методом совместного решения уравнений теории проектирования / Е. М. Грамузов, В. К. Май // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2013. – №6 (22).
9. Ship design and construction. – Jersey City, NJ : Society of Naval Architects and Marine Engineers. – 2004. – Т. 2. – С. 40.1-40.34.
10. Ray T. A global optimization model for ship design / T. Ray, R. P. Gokarn, O. P. Sha // *Computers in Industry*. – 1995. – Т. 26. – №. 2. – С. 175-192.
11. Molland A. F. (ed.). The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation. – Elsevier. – 2011.

Bibliography (transliterated)

1. Spravochnik spasatelja. Kniga 8. Nadvodnye i podvodnye spasatel'nye raboty. – Moskva FC VNII GOChS. – 2006. – 204 s.
2. Planas-Cuchi, Eulalia., Casal, Joaquim., Lancia, Antonio., and Bordignon, Leo. Protection of Equipment Engulfed in a Pool Fire / *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* – № 3. – Volume 9. – 1996.
3. Leblanc, D. Fire environments typical of navy ships : дис. – Worcester Polytechnic Institute. – 1998.
4. Kovalev, A. A., Vasil'ev, S. V., Kropivnickij, V. S. Uvelichenie manevrennosti pozharnogo katera s ispol'zovaniem pozharnogo nasosa kak jelementa podrulivajushhej sistemy. *Zbirka naukovih prac'. Problemi pozhezhnoj bezpeki*. Vip. 35 – H.: NUCZU. – 2014. – P. 100-105.
5. Kovalev, A. A., Kropivnickij, V. S. Taktiko-tehnicheskie trebovanija k konstrukcii pozharnogo katera. *Chrezvychajnye situacii: teorija, praktika, innovacii: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* Gomel', 22-23 maja 2014 g. – Gomel': GGTU im. P.O. Suhogo. – 2014. – S. 218-219.
6. Borisov, N. N., Ponomarjov, N. A., Jakovlev, S. G. Proektirovanie i tehniceskaja jekspluatacija SVJeO. – N.Novgorod: VGAVT. – 1997.
7. Gurovich, A. N., Rodionov, A. A. Proektirovanie spasatel'nyh i pozharnyh sudov – L.: Sudostroenie. – 1971. – 283 s.
8. Gramuzov, E. M., Maj, V. K. Opredelenie osnovnyh harakteristik spasatel'nogo sudna metodom sovmestnogo reshenija uravnenij teorii proektirovanija / *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. – 2013. – №6 (22).
9. Ship design and construction. – Jersey City, NJ : Society of Naval Architects and Marine Engineers. – 2004. – Т. 2. – P. 40.1-40.34.
10. Ray, T., Gokarn, R. P., Sha, O. P. A global optimization model for ship design. *Computers in Industry*. – 1995. – Т. 26. – №. 2. – P. 175-192.
11. Molland, A. F. (ed.). The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation. – Elsevier. – 2011

Надійшла (received) 21.06.2015

УДК 614.843/083

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ЖОРСТКОСТІ ПОЖЕЖНОГО РУКАВА ТИПУ «Т» ДІАМЕТРОМ 77 ММ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОЖЕЖНОГО РУКАВА

О. М. ЛАРИН¹, Г. О. ЧЕРНОБАЙ², В. Б. КОХАНЕНКО¹, С. Ю. НАЗАРЕНКО^{1*}

¹ Кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки, Національний університет цивільного захисту України, Харків, УКРАЇНА

² Кафедра прикладної механіки, Національний університет цивільного захисту України, Харків, УКРАЇНА
*email: itaart.nazarenko@gmail.com

АННОТАЦІЯ Встановлено, що механічні властивості, зокрема поздовжня жорсткість пожежного напірного рукава, визначають довготривалість його безпечної експлуатації. В роботі представлені результати експериментального дослідження поздовжньої жорсткості та пружних характеристик пожежного напірного рукава типу «Т» діаметром 77 мм з урахуванням структурних елементів пожежного рукава. Експеримент було проведено на дослідній машині ДМ-30 М. Так було проведено 5 циклів навантаження з двох хвилинним інтервалом часу, як для тканого армуючого каркасу так і для внутрішнього гідроізолюючого гумового шару.

Ключові слова: Рукав, напірний пожежний рукав, робочий тиск, поздовжня жорсткість, експериментальне визначення

АННОТАЦИЯ Установлено, что механические свойства, в частности продольная жесткость пожарного напорного рукава, определяют продолжительность его безопасной эксплуатации. В работе представлены результаты экспериментального исследования продольной жесткости и упругих характеристик пожарного напорного рукава типа «Т» диаметром 77 мм с учетом структурных элементов пожарного рукава. Эксперимент был проведен на опытной машине ДМ-30 М. Так было проведено 5 циклов нагрузки с двух минутным интервалом времени, как для тканого армирующего каркаса так и для внутреннего гидроизолирующего резинового слоя.

Ключевые слова: Рукав, напорный пожарный рукав, рабочее давление, продольная жесткость, экспериментальное определение

A STUDY OF LONGITUDINAL STIFFNESS OF T-TYPE FIRE HOSES WITH 77MM DIAMETER WITH STRUCTURAL ELEMENTS FIRE HOSE

O. LARIN¹, G. CHERNOBAY², V. KOHANENKO¹, S. NAZARENKO^{1*}

¹ Department of Engineering and rescue machinery, National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

² Department of Applied Mechanics, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper presents an experimental study of elastic characteristics of the fire hoses and internal structural elements of fire hoses. The fire hoses that has an inhomogeneous structure have been also investigated. The work analyses a longitudinal stiffness of the T-type fire hoses with an inner diameter of 77 mm. The experiments have been carried out on universal testing machine DM-30m, which gives a possibility to record the measurements with an accuracy of 0.001 mm. An outer frame of reinforcing fabric sleeve and internal waterproofing rubber layer are separately analyzed as well as whole fire hose. Samples with the 124 mm length for different materials have been prepared and have been tested under the cyclic loading. Each test consist of 5 same cycles with two minutes time interval. The delays as well as cycling gives material a time for stabilization. The results show that only three cycles is needed for the material stabilization. The results of experiments is presented as load curves obtained for the samples of outer frame of reinforcing fabric sleeve and for the samples of internal waterproofing rubber layer. Almost linear relationship between the load and deformation has been found for the both types of materials. The linearity makes it easy to approximate experimental results. The approximated curves allow to calculate the constant stiffness of materials, which form a fire hose. The same experimental procedure has been carried out with the specimen prepared from the pieceless fire hose. As a result, a longitudinal stiffness of the fire hose is found. The obtained data will be used for future theoretical and experimental work deals with a development of the technique for the estimation of the residual life of the fire hoses.

Keywords: Sleeve, pressure fire hose, working pressure, longitudinal stiffness, experimental determination

Ведення

При аналізі подій виходу з ладу пожежно-технічного обладнання в західному регіоні України

встановлено, що 60% відмов від загального числа відмов (за місяць 20% виїздів з відмовами пожежно-технічного обладнання) припадає на напірні пожежні рукави.

Напірні пожежні рукава є гнучкими трубопроводами, які використовуються для подання на відстань під тиском води і водних розчинів вогнегасних речовин, зокрема піноутворювачів.

Напірні рукава, разом з іншим пожежним устаткуванням, є одним із основних видів пожежного озброєння і від їх справного стану багато в чому залежить успішне гасіння пожеж.

Значна вартість пожежних рукавів визначає відповідні амортизаційні витрати по експлуатації рукавного господарства, які в більшості випадків перевищують витрати на інші види пожежного устаткування.

Таким чином заходи, що спрямовані на визначення залишкового ресурсу пожежних рукавів, можливості їх ремонту, надійності і безпечності подальшої експлуатації, в значній мірі сприяють підвищенню боєздатності пожежних частин, а також економічній ефективності їх функціонування.

Ціль роботи

Конструкція пожежних рукавів, їх типорозміри і характеристики, галузі застосування, умови експлуатації та методи випробувань наведені у відповідних нормативних документах [1].

Аналіз літературних джерел присвячених методам розрахунків напірних пожежних рукавів показав, що вони, здебільшого, зводяться до розрахунку втрат тиску в мережі [2 – 7].

Теоретичні та експериментальні дослідження міцності армуючого каркасу, який сприймає зусилля гідравлічної дії тиску рідини [8 – 12], використовуються при проектувальних розрахунках нових типів пожежних рукавів і не враховують неминучих змін в процесі експлуатації їх структури та якісних і кількісних характеристик, що робить актуальною розробку методів визначення залишкового ресурсу пожежних рукавів, які враховують ці зміни.

Виклад основного матеріалу

Задачею дослідження є розробка науково-обґрунтованого методу, який дозволяє визначити залишковий ресурс пожежних рукавів, можливість та доцільність їх ремонту і подальшого застосування з урахуванням змін структури та характеристик в умовах тривалих термінів реальної експлуатації.

При проведенні попередніх теоретичних робіт з розрахунку залишкового ресурсу пожежних рукавів виникла необхідність експериментального визначення механічних властивостей рукавів, зокрема поздовжньої жорсткості в умовах статичного навантаження. Наслідком відповідних випробувань [13] було визначення приведеної до одиниці довжини (I м) поздовжньої жорсткості пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм, яка при початковому навантаженні становила 77,88 кН/м, при повторному – збільшилась і стабілізувалась на трьох

наступних навантаженнях, які визначили майже однакові жорсткості, усереднене значення яких становить 135,41 кН/м.

При аналізі результатів початкового етапу досліджень виникла необхідність визначення механічних властивостей рукавів, зокрема поздовжньої жорсткості в умовах статичного навантаження з урахуванням неоднорідності їх структури.

Для проведення відповідних робіт було використано дослідну установку ДМ–30 М, яка встановлена в лабораторії кафедри прикладної механіки Національного університету цивільного захисту України.

Роздільне навантаження структурних елементів рукава (зовнішнього армуючого тканинного каркасу та внутрішнього гідроізолюючого гумового шару проводилось з постійним кроком (I мм) подовження із фіксацією відповідного зусилля (кН).

Обговорення результатів

Початковий режим навантаження (цикл № 1) проводився з недеформованим фрагментом тканинного армуючого каркасу пожежного рукава з випробувальною довжиною $l_{т0} = 124 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальна величина деформації становила $\Delta l_1^{max} = 7 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_1^{max} = 3960$ Н. Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила $\Delta l_1^{res} = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

При повторному навантаженні (цикл № 2), яке було проведено через дві хвилини після першого, максимальна величина деформації становила $\Delta l_2^{max} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_2^{max} = 4800$ Н. Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила $\Delta l_2^{res} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Числові параметри трьох наступних режимів навантаження (цикли № 3 – № 5), які було проведено з аналогічними двохвилинними інтервалами, практично не відрізняються один від одного. Максимальна величина їх деформації становила $\Delta l_{3-5}^{max} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_{3-5}^{max} = 4992 \div 5400$ Н. Залишкова деформація фрагменту після розвантаження становила $\Delta l_{3-5}^{res} = 1$ мм.

Таблиця 1 – Результати досліджень фрагменту тканинного армуючого каркасу

Деформація, мм	Навантаження, Н				
	Цикл № 1	Цикл № 2	Цикл № 3	Цикл № 4	Цикл № 5
1	2	3	4	5	6
0	0	-	-	-	-
1	240	-	-	-	-
2	504	0	-	-	-
3	1176	720	0	-	-

4	1896	1440	1080	0	-
5	2208	3840	1968	1080	0
6	2592	4440	3000	2160	1120
7	3960	4800	4200	3480	1944
8	-	-	4932	4560	3360
9	-	-	-	5400	4440
10	-	-	-	-	5376

Діаграми, які відповідають результатам випробувань наведені на рисунку 1.

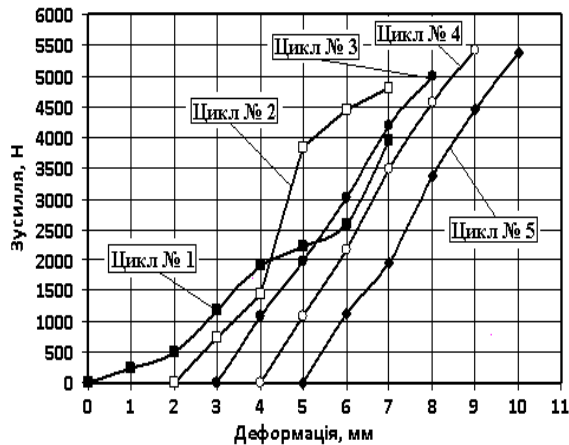


Рис. 1 – Діаграми навантажень фрагменту армуючого каркасу пожежного рукава.

Майже лінійна залежність між навантаженням та деформацією фрагменту армуючого каркасу напірного пожежного рукава дозволяє апроксимувати засобами Microsoft Word результати експериментальних досліджень відповідними лінійними трендами із визначенням їх рівнянь (рис. 2).

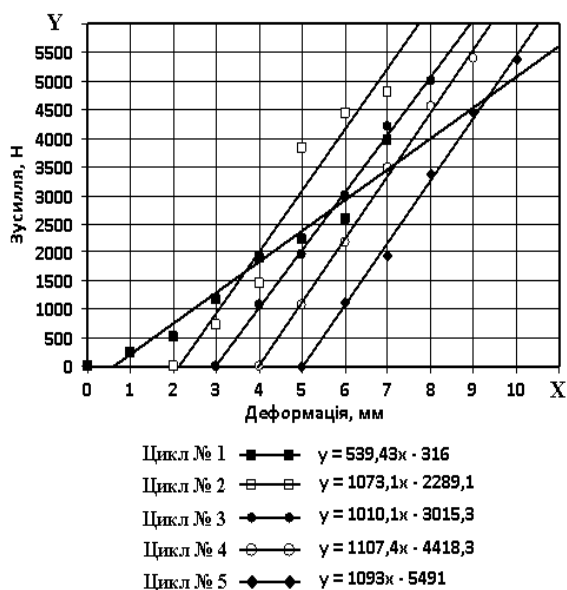


Рис. 2 – Діаграми і рівняння трендів навантажень фрагменту армуючого каркасу пожежного рукава.

Аналіз рівнянь трендів визначив значне (майже у два рази) збільшення жорсткості фрагменту армуючого каркасу пожежного рукава в циклах навантаження № 2 ÷ № 5, усереднена жорсткість яких становить:

$$C_{T(2-5)} = \frac{1073,1 + 1010,1 + 1107,4 + 1093,0}{4} = 1070,9 \frac{H}{мм} = 1070,9 \frac{кН}{м},$$

в порівнянні із циклом № 1, для якого:

$$C_{T1} = 539,43 \frac{H}{мм} = 539,43 \frac{кН}{м}.$$

Для подальших досліджень доцільно визначити жорсткість (k_T) армуючого каркасу пожежного рукава приведену до одиниці його довжини ($L=1000$ мм):

– цикл № 1

$$k_{T1} = \frac{C_{T1} \cdot l_{T0}}{L} = \frac{539,43 \cdot 124}{1000} = 66,89 \frac{кН}{м};$$

– цикли № 2 – № 5

$$k_{T(2-5)} = \frac{C_{T(2-5)} \cdot l_{T0}}{L} = \frac{1070,9 \cdot 124}{1000} = 132,79 \frac{кН}{м}.$$

Початковий режим навантаження (цикл № 1) проводився з недеформованим фрагментом внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава випробувальною довжиною $l_{T0} = 154 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальна величина деформації становила $\Delta l_1^{\max} = 10 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_1^{\max} = 288$ Н.

Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила $\Delta l_1^{\text{ост}} = 4 \cdot 10^{-3}$ м.

При повторному навантаженні (цикл № 2) фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава, яке було проведено через дві хвилини після першого, максимальна величина деформації становила $\Delta l_2^{\max} = 8,0 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_2^{\max} = 312$ Н.

Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила $\Delta l_2^{\text{ост}} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

При наступному навантаженні (цикл № 3) фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава, яке було проведено через дві хвилини після другого, максимальна величина деформації становила $\Delta l_3^{\max} = 12,0 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні $F_3^{\max} = 384$ Н.

Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила $\Delta l_3^{\text{ост}} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Числові параметри двох наступних режимів навантаження (цикли № 4 – № 5) фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава, які було проведено з аналогічними двохвилинними інтервалами, практично не відрізняються один від одного. Їх максимальна величина деформації становила $\Delta l_{4-5}^{max} = 10,0 \cdot 10^{-3} м$, при середньому навантаженні $F_{4-5}^{max} = 384 Н$.

Залишкова деформація фрагменту після розвантаження становила $\Delta l_{4-5}^{ост} = 1 мм$.

Результати досліджень фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава типу «Т» наведені в табл. 2, а діаграми, які відповідають результатам випробувань наведені на рисунку 3.

Таблиця 2 – Результати досліджень фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару

Деформація, мм	Навантаження, Н				
	Цикл № 1	Цикл № 2	Цикл № 3	Цикл № 4	Цикл № 5
0	0	-	-	-	-
1	48	-	-	-	-
2	72	-	-	-	-
3	120	-	-	-	-
4	144	0	-	-	-
5	168	48	0	-	-
6	192	120	24	0	-
7	216	192	96	24	0
8	240	216	120	96	24
9	264	240	144	120	72
10	288	264	192	192	120
11	-	288	240	216	168
12	-	312	264	240	216
13	-	-	288	264	240
14	-	-	312	312	264
15	-	-	360	360	288
16	-	-	384	384	336
17	-	-	-	-	384

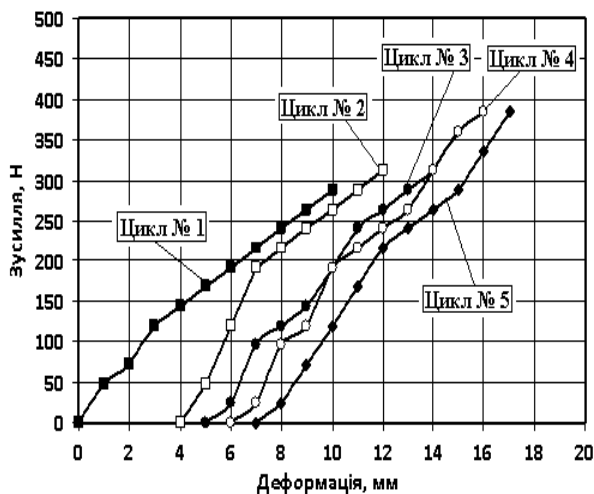


Рис. 3 – Діаграми навантажень внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава.

Майже лінійна залежність між навантаженням та деформацією фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару напірного пожежного рукава дозволяє апроксимувати засобами Microsoft Word результати експериментальних досліджень відповідними лінійними трендами із визначенням їх рівнянь (рис. 4).

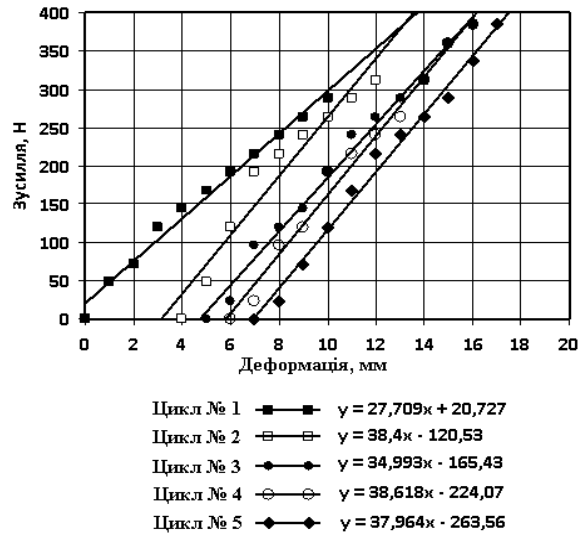


Рис. 4 – Діаграми і рівняння трендів навантажень фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава.

Аналіз рівнянь трендів визначив значне збільшення жорсткості фрагменту внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава в циклах навантаження № 2 ÷ № 5, усереднена жорсткість яких становить:

$$C_{т(2-5)} = \frac{1073,1 + 1010,1 + 1107,4 + 1093,0}{4} = 1070,9 \frac{Н}{мм} = 1070,9 \frac{кН}{м}$$

в порівнянні із циклом № 1, для якого:

$$C_{т1} = 27,709 \frac{Н}{мм} = 27,709 \frac{кН}{м}$$

Для подальших досліджень доцільно визначити жорсткість ($k_{г1}$) внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава приведену до одиниці його довжини ($L=1000 мм$):

– цикл № 1

$$k_{г1} = \frac{C_{т1} \cdot \ell_{г0}}{L} = \frac{27,709 \cdot 154}{1000} = 4,27 \frac{кН}{м}$$

– цикли № 2 – № 5

$$k_{\Gamma(2-5)} = \frac{C_{\Gamma(2-5)} \cdot \ell_{\Gamma 0}}{L} = \frac{37,49 \cdot 154}{1000} = 5,77 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Зважаючи на вищезазначене загальна приведена до одиниці довжини (l м) жорсткість пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм становить:

– цикл № 1

$$k_1 = k_{\Gamma 1} + k_{\Gamma 2} = 66,89 + 4,27 = 71,16 \frac{\text{кН}}{\text{м}};$$

– цикли № 2 – № 5

$$k_{(2-5)} = k_{\Gamma(2-5)} + k_{\Gamma(2-5)} = 132,79 + 5,77 = 138,56 \frac{\text{кН}}{\text{м}},$$

що відповідає значенням попередніх випробувань [11]. Відхилення становлять:

– цикл № 1

$$\delta_1 = \frac{77,88 - 71,16}{77,88} 100\% = 8,63\%;$$

– цикли № 2 – № 5

$$\delta_{2-5} = \frac{|135,41 - 138,56|}{135,41} 100\% = 2,33\%.$$

Висновки

Для наступних теоретичних та експериментальних робіт з розрахунку залишкового ресурсу пожежних рукавів проведено визначення механічних властивостей, зокрема поздовжньої жорсткості пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм в умовах статичного навантаження з урахуванням неоднорідності його структури.

При початковому навантаженні жорсткість тканинного армуючого каркасу пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм становить 66,89 кН/м, а чотири наступних навантаження визначили майже однакові жорсткості, усереднене значення яких становить 132,79 кН/м.

При початковому навантаженні жорсткість внутрішнього гідроізолюючого гумового шару пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм становить 4,27 кН/м, а чотири наступних навантаження визначили майже однакові жорсткості, усереднене значення яких становить 5,77 кН/м.

Загальна приведена до одиниці довжини (l м) жорсткість пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 77 мм становить при початковому навантаженні 71,16 кН/м, а на наступних – 138,56 кН/м.

Відхилення від значень попередніх випробувань [13] становлять від 8,63% на початковому циклі навантаження до 2,33% на наступних, коли жорсткість елементів пожежного рукава стабілізувалась.

Список літератури

1. Пожежна техніка. Рукава пожежні напірні. Загальні технічні умови. ДСТУ 3810–98. [Чинний від 2005-05-01]. – К. : Держспоживстандарт України. – 1998. – XII. – 38 с. – (Національний стандарт України).
2. Безбородько, М. Д. Пожарная техника / М. Д. Безбородько, П. П. Алексеев, Б. А. Максимов, Г. И. Новиков – М. – 1979. – 435 с.
3. Иванов, Е. Н. Противопожарное водоснабжение / Е. Н. Иванов – М. – 1986. – 315 с.
4. Качалов, А. А. Противопожарное водоснабжение / А. А. Качалов, Ю. П. Воротынцева, А. В. Власов – М. – 1985. – 286 с.
5. Добровольский, А. А. Пожарная техника / А. А. Добровольский, Ф. Ф. Пересльских – Киев. – 1981. – 239 с.
6. Щербина, Я. Я. Основы противопожарной техники / Я. Я. Щербина – Киев. – 1977. – 234 с.
7. Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschäumen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden: Ständige Konferenz der Innenminister und - Senatoren der Länder, Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. – Karlsruhe. – 2008 – 61 с.
8. Thompson, J. M. T. Static elastica formulations of a pipe conveying fluid / J. M. T. Thompson, T. S. Lunn // *J. Sound and Vibr.* – 1981. – Vol. 77, N 1. – P. 127-132.
9. Johnson, R. O. The stability of simply supported tubes conveying a compressible fluid / R. O. Johnson, J. E. Stoneking, T. O. Carley // *J. Sound and Vibr.* – 1987. – Vol. 117. – N 2. – P. 335-350.
10. Gi-Chun Lee An experimental study and finite element analysis for finding leakage path in high pressure hose assembly / Gi-Chun Lee, Hyoung-Eui Kim, Jong-Won Park, Hai-Lan Jin, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing.* – June 2011. – Volume 12, Issue 3. – P. 537-542.
11. Моторин, Л. В. Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии / Л. В. Моторин, О. С. Степанов, Е. В. Братолобова // *Изв. вузов. Технология текст. пром-сти.* – 2011. – №.1 – С. 126 - 133.
12. Cho, J. R. (2006) Prediction of effective mechanical properties of reinforced braid by 3-D finite element analysis / Song J. I., Choi J. H. // *Fract Strength Solids* – 2006. – 306. – P. 799-804.
13. Ларін, О. М. Визначення поздовжньої жорсткості пожежного рукава / О. М. Ларін, Г. О. Чернобай,

С. Ю. Назаренко // *Проблеми пожежної безпеки: збірник наукових праць*. – Х.: НУЦЗУ. – 2014. – С. 133-138.

Bibliography (transliterated)

1. Fire trucks. Sleeves firemen pressure. General specifications. GOST 3810-98. [Effective as of 2005-05-01]. - Kyiv: *State Committee of Ukraine*. – 1998. – XII. – 38 p. - (National Standard of Ukraine).
2. **Bezborod'ko, M. D., Alekseev, P. P., Maksimov, B. A., Novikov, G. I** Fire trucks – Moscow. – 1979. – 435 p.
3. **Ivanov, E. H.** Fire water – Moscow. – 1986. – 315 p.
4. **Katchalov, A. A., Vorotintcev, Y. P., Vlasov, A. B.** Fire water – Moscow. – 1985. – 286 p.
5. **Dobrovolsky, A. A., Pereslytskih, F. F.** Fire trucks – Kyiv. – 1981. – 239 p.
6. **Shcherbina, Y. Y.** Fundamentals of fire-fighting equipment – Kyiv– 1977. – 234 p.
7. Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschäum führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden: Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. – Karlsruhe. – 2008 – 61 c.
8. **Thompson, J. M. T., Lunn, T. S.** Static elastica formulations of a pipe conveying fluid / *J. Sound and Vibr.* – 1981. – Vol. 77, N 1. – P. 127-132.
9. **Johnson, R. O., Stoneking, J. E., Carley, T. O.** The stability of simply supported tubes conveying a compressible fluid. – *J. Sound and Vibr.* - 1987. – Vol. 117, N 2. – P. 335-350.
10. **Gi-Chun Lee, Hyoung-Eui Kim, Jong-Won Park, Hai-Lan Jin, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim** An experimental study and finite element analysis for finding leakage path in high pressure hose assembly / *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – June 2011. – Volume 12, Issue 3. – P. 537-542.
11. **Motorin, L. V. A., Stepanov, O. S., Bratolyubova, E. V.** Simplified mathematical model for strength calculation of pressure fire hoses in hydraulic impact / *Math. universities. Technology text. prom-sti.* – 2011. – №.1 – S. 126 - 133.
12. **Cho, J. R., Choi, J. H.** Prediction of effective mechanical properties of reinforced braid by 3-D finite element analysis. *Fract Strength Solids* – 2006. – 306. – P. 799-804.
13. **Larin, A. M., Chernobay, G. A., Nazarenko, S. Y.** Determination of longitudinal stiffness fire hose / *Problems of Fire: technologies*. – H. : NUCDU. – 2014. – P. 133-138.

Надійшла (received) 15.06.2015

УДК 629.11:534.12

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ НАПІВПРИЧЕПУ АВТОЦИСТЕРНИ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕТОДАМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕХАНІКИ

О. О. ЛАРИН, К. Є. ГРИНЧЕНКО*

Кафедра динаміки та міцності машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*email: ksenia_grinchenko@ukr.net

АННОТАЦІЯ У роботі визначаються показники надійності та ресурс напівпричепу автоцистерни на основі ймовірнісних характеристик вібрацій елементів конструкції під час її руху по дорогах з покриття різної якості. Досліджується випадковий вплив навантаження з урахуванням його запізнення у часі на задній вісі транспортного засобу. За допомогою метода скінченних елементів та методів статистичної динаміки визначені ймовірнісні характеристики поведінки системи. Запропоновано підхід до оцінки надійності конструкції за критерієм накопичення втоми.

Ключові слова: автоцистерна, транспортний засіб, випадкові коливання, МСЕ, ресурс, надійність.

АННОТАЦИЯ В работе определяются показатели надежности и ресурс полуприцепа автоцистерны на основе вероятностных характеристик вибраций элементов конструкции во время ее движения по дорогам с покрытием разного качества. Исследовалось случайное влияние нагрузки с учетом запаздывания во времени ее действия на заднюю ось транспортного средства. С помощью метода конечных элементов и методов статистической динамики определены вероятностные характеристики поведения системы. Предложен подход к оценке надежности конструкции по критерию накопления усталости.

Ключевые слова: автоцистерна, транспортное средство, случайные колебания, МКЭ, ресурс, надежность.

DEFINITION OF RELIABILITY PARAMETERS TANKER OF SEMITRAILER IN EXPLOITATION BY COMPUTER MECHANICS

O. LARIN, K. GRINCHENKO

Department of dynamics and strength of machines, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper presents the determination of reliability and life-time of semi-trailers based on random vibrations of driving on different type of roads. Damage to the tank capable appears during operation due to the accumulation and development of fatigue or corrosion, which leads to cracks and depressurization boiler tank. Therefore, development of methods for modeling settlement tank designs to assess their durability and reliability prediction at the design stage and in operation to ensure safety is important for practical problem. For solving problem random vibrations of vehicle with the influence of the lag effect the mathematical model was made. Particularly was considered the mathematical model random impacts vector with lag time effect on axis of vehicle. Finite-element model of the boiler semitrailer tanker was developed. The problem of natural vibrations was solved using the FEM, obtained natural frequencies and modes. The natural frequencies has dense spectrum. The next step was obtained probabilistic behaviors of the system, such as spectral density and standard deviation of displacements and stresses, the influence of the lag effect of external forces using the methods of statistical dynamics. After analysis of spectral density of displacement and stress was determined that in account of time lag spectral density has a lot of peaks. In paper has been determined that the distribution of the standard deviation. The largest amplitude was in the middle of the tank. When analyzing the standard deviation at stresses determined that there are dangerous zone near the supports and hatches. Using probabilistic characteristics were obtained determine the parameters of reliability. The approach to assessing the reliability of construction was offered by criteria for the accumulation of fatigue. The graph probability of failure-free operation is life-time has been defined for all types of loading.

Keywords: Semi-trailer, boiler tank, heavy vehicle, random vibrations, FEM, life-time, reliability.

Вступ

Перевезення нафтопродуктів в автомобільних напівпричепках по автошляхам України є важливим елементом системи їх транспортування і відіграє значну роль у забезпеченні потреб в них кінцевого споживача. При перевезенні нафтопродуктів автоцистерни зазнають великі динамічні перевантаження, а також відчувають дію агресивного

середовища, що за певний час експлуатації може привести до їх пошкодження. Так, накопичення втоми та корозії металу, здатне призвести до утворення та росту тріщин і, внаслідок цього, розгерметизації її котла. Несвоєчасне виявлення пошкоджень конструкції може призвести до виникнення аварійно-небезпечних ситуацій. Для того, щоб попередити такі події важливо вчасно провести технічне обслуговування та ремонт. Тому діагностування

технічного стану автоцистерн з метою своєчасного виявлення пошкоджень її елементів є вкрай важливою та актуальною задачею.

В сучасній технічній літературі приділяється багато уваги питанням дослідження працездатності елементів конструкції великогабаритних транспортних засобів (ТЗ) [1-11], оцінці втоми та надійності несучих рамних елементів [1-3]. Більшість робіт поділяється на дві групи. До першої групи слід віднести дослідження динаміки транспортних засобів (ТЗ) на спрощених моделях. До другої відносяться дослідження в яких представлено скінченно-елементним моделюванням гармонічних та випадкових коливань відповідних ТЗ.

В роботах [7-11] проводиться аналіз надійності ТЗ, у яких модель представлена у вигляді зосереджених мас і жорсткостей, що їх зв'язують. Навантаження задається у вигляді спектральної щільності вертикальної нерівності [7,8], або процес розкладається на декілька стаціонарних процесів [10]. В якості вихідних даних використовувалися результати експериментів, проведених різними авторами. У статті [11] описується аналіз вібрацій ТЗ методом псевдо збуджень. Результати отримані у вигляді середньоквадратичного відхилення переміщень. За рахунок того, що використовувалась спрощена модель, не можна визначити напруження, що виникають у внутрішніх частинах транспортного засобу.

Відповідна проблема вирішується визначенням динамічного напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкції в експлуатації, застосовуючи для цього скінченно-елементні (СЕ) моделі [8-14]. Випадкові коливання досліджувались в лінійній постановці вважаючи, що навантаження представляє собою вектор незалежних стаціонарних широкосмугових процесів, які моделюють вплив нерівностей дорожнього покриття на колеса під час руху ТЗ. Працездатність конструкції аналізується на основі оцінки їх ресурсу по втомі. Розглянуті в роботах моделі є вузько спеціалізованими, а результати придатні для оцінки втоми лише конкретних типів та моделей транспортних засобів. Проте підходи та загальні висновки з актуальності питань аналізу втоми колісних транспортних засобів,

а також необхідність розв'язання задачі їх випадкових коливань є більш загальними та співпадають із задачами та метою даної роботи.

Проведений аналіз робіт [1-6], дозволяє стверджувати, що в зазначених роботах недостатньо уваги приділено визначенню параметрів надійності конструкцій напівпричепів автоцистерн безрамного типу. В цьому сенсі заслуговує на увагу робота [4], де представлено підхід до оцінки надійності залізничних цистерн. Виконано аналіз НДС циліндричної оболонки та еліптичних днищ котла залізничної цистерни при статичному навантаженні та залишкових деформацій котла залізничної цистерни від пошкоджень типу «вм'ятина» з використанням МСЕ і проведено оцінку надійності її елементів при відмовах багато циклової втоми. Але автори обмежились лише аналізом міцності у детермінованій постановці, що є досить грубим припущенням, та в рамках досліджень автоцистерни є неприпустимим.

Загалом аналіз літературних джерел інформації вказує на те, що зазвичай автори досліджень недостатньо уваги приділяють питанням адекватності завдання зовнішнього навантаження, що значно впливає на показники надійності. Так, у більшості робіт навантаження задається або детермінованим, або у вигляді шуму, при цьому не враховується, що багатівісні колісні ТЗ мають залежний вплив на свої осі. Дійсно навантаження, яке діє на передню вісь автомобіля під час цього руху є таким самим як і навантаження на задню вісь але воно діє із запізненням на час проходження ТЗ шляху між цими осями [12, 6]. Для детермінованого навантаження це відповідає зміні фази, а у разі застосування моделі випадкового навантаження необхідно враховувати наявність взаємної кореляції між компонентами вектору навантаження.

Мета роботи

Метою даного дослідження є визначення показників надійності та ресурсу напівпричепу автоцистерни на основі імовірнісних характеристик вібрацій елементів конструкції під час її руху з урахуванням запізнення у часі навантаження, що діє на задню вісь ТЗ.

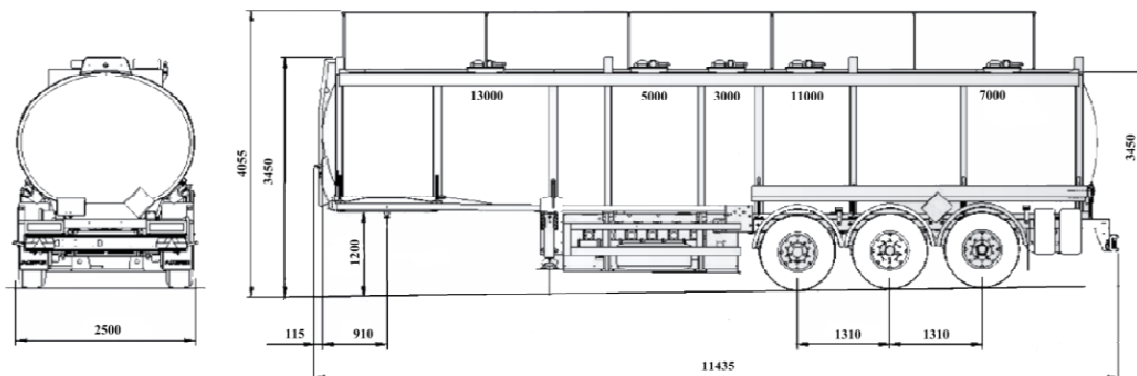


Рис. 1 – Креслення напівпричепу автоцистерни [13]

Напівпричіп складається зі зовнішньої оболонки, внутрішніх хвилерізів, глухих перегородок, люків та опор. Креслення конструкції представлено на рис.1. Напівпричіп має наступні базові розміри: корпус еліптичної форми (менший радіус – 0,964 м, більший – 1,244 м), довжина корпусу цистерни – 11,435 м, висота еліптичних днищ – 0,288 м, товщина стінок прийнята однакова для усієї конструкції (10 мм). Матеріалом є сталь 09Г2С з наступними механічними властивостями: межа пружності $[\sigma_B]=456$ МПа, модуль пружності $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, щільність $\rho = 7850$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.21$ [14].

Моделювання випадкових коливань

Основним збудником випадкових вібрацій є нерівності дорожньої поверхні, що діють на колеса автоцистерни під час руху.

Мікропрофіль дороги є випадковою функцією протяжності дороги і його прийнято розглядати як випадкову функцію, що задовольняє наступним припущенням: функція ординати мікропрофілю підпорядковуються нормальному закону розподілу; довжини нерівностей обмежені по верхній і нижній межам; мікропрофіль змінюється випадковим чином тільки в вертикальній поздовжній площині дороги.

Достатніми статистичними характеристиками мікропрофілю дороги є його спектральна щільність, яка дає уявлення про частоту повторення довжин нерівностей (про переважаючих частотах).

З літературних джерел відомі спектральні щільності збурення від нерівностей для твердих дорожніх покриттів [13]:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{0.00135v}{\omega^2 + 0.04v^2} + \frac{0.00006v(\omega^2 + 0.36v)}{(\omega^2 - 0.36v^2)^2 + 0.0036v^4}, \quad (1)$$

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{0.003375v}{\omega^2 + 0.25v^2} + \frac{0.00025v(\omega^2 + 4v^2)}{(\omega^2 - 4v^2)^2 + 0.64v^4}, \quad (2)$$

де v – швидкість у м/с, ω – частота, $S_{\eta}(\omega)$ – спектральна щільність мікропрофілю дороги.

Спектральна щільність мікропрофілю дороги для асфальтного та булижного покриття на швидкостях 60 км/год та 90 км/год (див. рис.2).

Рішення зазначеної задачі полягає у визначенні ймовірнісних характеристик відгуку системи по заданим ймовірнісним характеристикам навантажень і параметрів системи [15].

З огляду на те, що конструкція напівпричепи автоцистерни є досить складною, для визначення параметрів її руху пропонується використовувати МСЕ [16].

Задача вимушених коливань, в тому числі випадкових, в рамках МСЕ зводиться до вирішення наступного рівняння:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (3)$$

де $[M]$, $[D]$, $[K]$ - матриці мас, демпфування та жорсткості відповідно, $\{u\}$ - переміщення системи, $\{F(t)\}$ - випадкове зовнішнє навантаження, t - час.

При дослідженні випадкових коливань використовується метод спектральних перетворень. Суть методу полягає у розгляді задачі у частотному діапазоні. Для цього навантаження та відгук системи представляється у виді спектрів.

Введемо спектральне взаємно зворотне перетворення для вектору навантаження та відгуку системи:

$$\{F(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{C_F(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega, \quad (4)$$

$$\{u\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{C_u(\omega)\} e^{i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

де ω – частота, на який відбуваються випадкові коливання, $i = \sqrt{-1}$ – мнима одиниця, $\{C_F(\omega)\}$ та $\{C_u(\omega)\}$ - вектори вузлових спектральних функцій навантаження та відгуку системи.

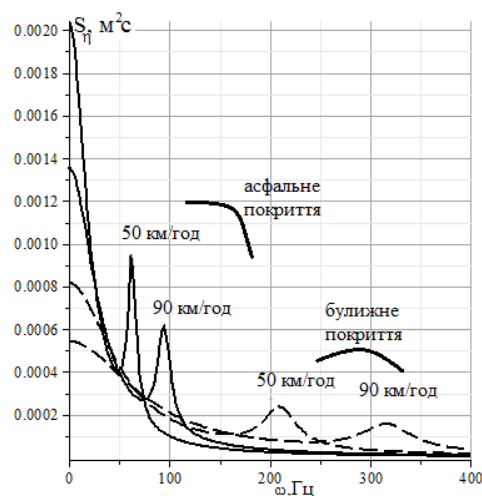


Рис. 2 – Графік навантаження при швидкості 50 км/год та 90 км/год

Підставляючи (4) та (6) у співвідношення (3) отримуємо рівняння для спектрів:

$$[Z(\omega)]\{C_u\} = \{C_F\}, \quad (6)$$

де $[Z(\omega)]$ - динамічна матриця жорсткості.

$$[Z(\omega)] = (-\omega^2[M] + i\omega[D] + [K]), \quad (7)$$

$$\{C_u\} = [Z(\omega)]^{-1}\{C_F\} = [A(\omega)]\{C_F\}. \quad (8)$$

Матриця динамічної податливості $[A(\omega)]$ може бути знайдена з розкладанням за власними формами [17] або безпосереднім оберненням $[Z(\omega)]$ на кожній частоті ω_e .

Зв'язок між спектрами відгуку та навантажень, дозволяє визначити матрицю спектральних щільностей відгуку системи, яка знаходиться за формулою:

$$[S_u(\omega)] = [A(\omega)][S_f(\omega)][A^*(\omega)], \quad (10)$$

де $[S_f(\omega)]$ - матриця взаємних спектральних щільностей навантаження, $[A^*(\omega)]$ - спряжена матриця динамічної податливості.

Таким чином вирішення задачі випадкових коливань зводиться до матричного виразу (10). Важливим питанням залишається визначення матриці взаємних спектральних щільностей вектору навантаження. Навантаження на котел цистерни передається від системи підресорення. Моделювання навантаження в СЕ моделі зосередженні в пружних елементах в двох точках конструкції.

$$\{F(t)\} = \{0 \dots f_1(t) \dots 0 \dots f_2(t) \dots 0\}^T, \quad (11)$$

де $f_1(t)$ та $f_2(t)$ - сили, які діють на автоцистерну в наслідок деформації елементів підресорення під час руху по нерівностям дорожнього покриття. При цьому слід враховувати той факт, що на другу вісь ТЗ діє те саме навантаження але з запізненням у часі. Відповідне пояснення наведено у схемі (рис.3). Таким чином, компоненти вектору навантаження мають вид:

$$f_1(t) = -c_{s_1} \eta(t) \text{ та } f_2(t) = -c_{s_2} \eta(t + \tilde{t}), \quad (12)$$

де c_{s_1} - жорсткість підвіски передньої осі ТЗ, c_{s_2} - жорсткість підвіски задньої осі, $\eta(t)$ - нерівність дороги, \tilde{t} - це час запізнення, який залежить від міжосьової довжини (L_s) та швидкості руху ТЗ (v):

$$\tilde{t} = \frac{L_s}{v}. \quad (13)$$

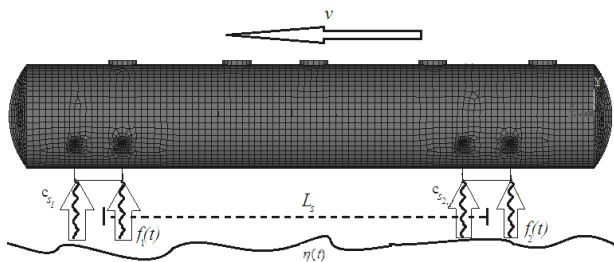


Рис. 3 – Схема навантаження

Спектральна щільність кожного із компонент вектору навантаження визначається за формулою:

$$[S_f(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [K_f] e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (14)$$

де $K_f(\tau)$ - це кореляційна функція зовнішньої сили, що моделює вплив нерівностей дорожнього полотна через ТЗ.

$$K_{f_j} = \left\langle f_j(t+\tau) \cdot f_j(t)^* \right\rangle = c_{s_j}^2 K_{\eta}(\omega), \quad (15)$$

де j приймає значення 1 та 2 для передньої та задньої осей відповідно. Спектральна щільність цієї компоненти відповідно має вигляд:

$$S(\omega)_{f_j} = c_{s_j}^2 S_{\eta}(\omega), \quad (16)$$

$$S_{f_2 f_1} = S_{f_1 f_2}^* = c_{s_1} c_{s_2} S_{\eta}(\omega) e^{-i\omega\tilde{t}}. \quad (17)$$

Взаємна спектральна щільність це комплексний вираз, функція когерентності для неї, у даному випадку запізнення дорівнює 1, тобто здвиг за фазою між навантаженнями $f_1(t)$ та $f_2(t)$ фіксований у часі, тем не менш сам здвиг за фазою існує, що приводить до періодичної зміни фази дії сил за деяким набором частот. Фаза взаємної спектральної щільності може бути визначена:

$$\gamma(\omega) = \arctg \left(\frac{\text{Im}[S_{f_1 f_2}]}{\text{Re}[S_{f_1 f_2}]} \right). \quad (18)$$

Відповідно до цього виразу, з урахування (23), періодична зміна фази відбувається на частотах кратних величині $\frac{1}{\tilde{t}}$:

$$\Omega = \frac{\pi}{2\tilde{t}} k, \quad (19)$$

де k приймає значення $k = 1, 3, 5, 7, 9 \dots$

Таким чином, враховуючи отримані вирази для спектральних щільностей та кореляційних функцій компонентів вектору навантаження з урахуванням формул Вінера-Хінчина можна представити матрицю взаємних спектральних щільностей навантаження $[S_f(\omega)]$ у наступному вигляді:

$$[S_f(\omega)] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & c_{s_1}^2 S_{\eta}(\omega) & 0 & c_{s_1} c_{s_2} S_{\eta}(\omega) e^{i\omega\tilde{t}} & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & c_{s_1} c_{s_2} S_{\eta}(\omega) e^{-i\omega\tilde{t}} & 0 & c_{s_2}^2 S_{\eta}(\omega) & \dots \\ \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

де $S_{\eta}(\omega)$ - це спектральна щільність мікропрофілю дороги (див. (1), (2) та рис. 2).

Скінченно-елементна модель

При моделюванні випадкових коливань використовувалась скінченно-елементна модель, яка складається з основного корпусу, опор та ресор на які приводиться навантаження. СЕ-модель представлена на рисунку 4.

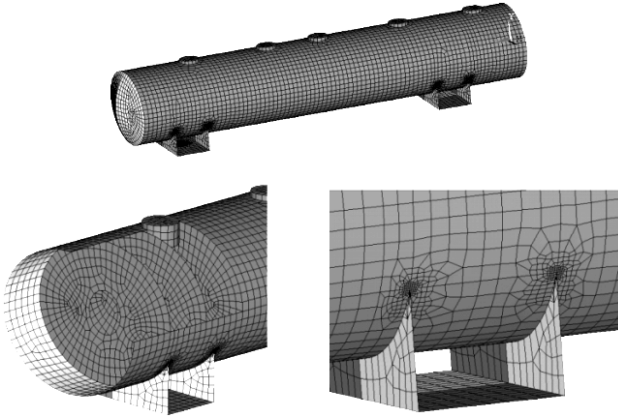


Рис. 4 – СЕ-модель

Аналіз випадкових коливань

Вирішення задачі випадкових коливань шукалось розкладанням за власними формами. Тому був проведений розрахунок власних коливань конструкції та знайдені власні частоти у діапазоні від 0 до 215 Гц. Спектр власних частот достатньо густий. Він представлений на рисунку 5.

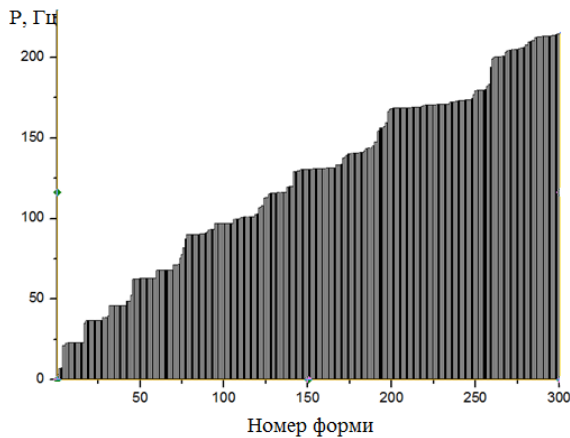


Рис. 5 – Діаграма власних частот

За допомогою отриманих спектральних щільностей було обчислено середнє квадратичне відхилення (СКВ) переміщень.

$$\{\sigma_u\} = \sqrt{\int_0^{\infty} diag[S_F(\omega)]d\omega}. \quad (21)$$

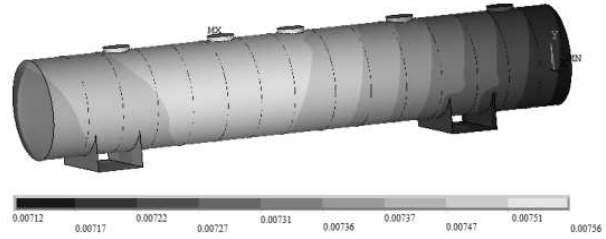


Рис.6 – Розподілення СКВ переміщень конструкції

Аналіз розподілення СКВ переміщень при усіх типах навантаження має той самий вигляд та дозволяє зазначити, що зоною найбільшого СКВ переміщень є середина конструкції. Значення СКВ переміщень при русі по асфальтному та буличному покритті відрізняється майже на 2 порядки. Найбільше значення спостерігається при русі зі швидкістю 50 км/год по буличному покритті, значення СКО переміщень в цьому випадку більше на 19% ніж при русі на швидкості 90 км/год.

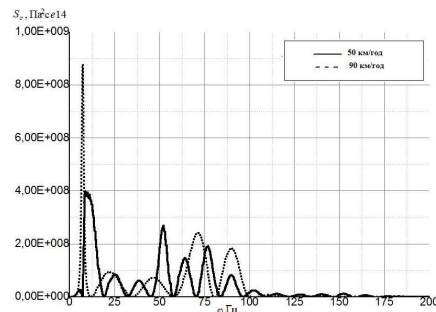


Рис. 7 – Спектральна щільність напружень при швидкості 90 та 50 км/год на буличному покритті.

За зазначеними графіками видно, що, спектральна щільність має дуже багато сплесків, які відповідають здвигу за фазою зовнішнього навантаження. Спектральна щільність при швидкості 90 км/год має сплеск на частоті 7.5 Гц, що відповідає власній формі коливань усієї конструкції. Також більші сплески на спектральних щільностях спостерігаються на частотах відповідних максимальним збудженням від мікропрофілю дороги.

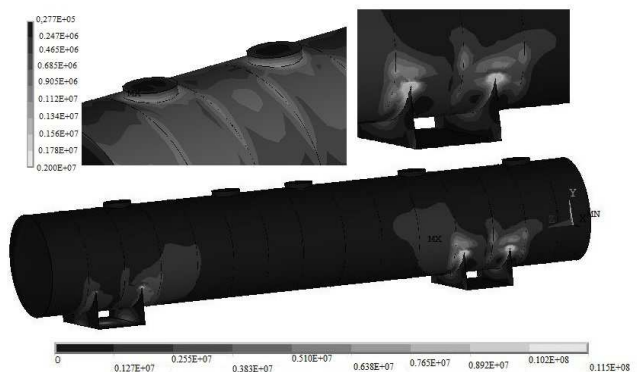


Рис. 8 – Розподілення СКВ напружень конструкції

Таблиця 1 Значення СКВ напружень

Швидкість, км/год	Вид покриття	
	Асфальтне	Булижникове
50	$0.9 \cdot 10^5$ Па	$215 \cdot 10^5$ Па
90	$1.14 \cdot 10^5$ Па	$188 \cdot 10^5$ Па

Після аналіз значень СКВ напружень у зоні біля люку видно, що при русі по булижному покритті значення зростають майже на 3 порядки, порівняно зі значеннями СКВ напружень при русі по асфальтному покритті.

За СКВ напруження визначені небезпечні точки конструкції та підрахована спектральна щільність напруження у цих точках.

Як видно з проведених розрахунків, небезпечною точкою для конструкції є стик основної цистерни з опорою. Для цієї точки отримані спектральні щільності для усіх типів навантаження.

Також можна зазначити, що навкруги люків існують зони, де значення напруження більше ніж на інших ділянках але не перевищують границю пружності. Для цієї точки отримані спектральні щільності напруження для усіх варіантів навантаження.

Аналіз надійності конструкції

Для визначення ресурсу конструкції використовується степеневий закон кінетики накопичення пошкоджуваності у рамках концепції ефективних напружень Работнова-Качанова:

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma_a}{1-D} \tag{22}$$

Таким чином, кінетика росту пошкоджуваності описується рівнянням [18]:

$$\frac{d}{dt} D = B(\tilde{\sigma}_a)^c = B \left(\frac{\sigma_a}{1-D} \right)^c, \tag{23}$$

де B та c константи кінетичного рівняння, які визначаються експериментально та можуть бути виражені через характеристики кривої Веллера. [16]

$$B = \frac{\omega_e}{\sigma_{-1}^m N_0 (m+1)}, \tag{24}$$

де σ_{-1} - це границя витривалості, N_0 , m - параметри кривої Веллера, ω_e - ефективна частота. Як видно з рис. 7, спектральна щільність має багато сплесків, тому треба розглядати цей процес, як набір вузькополосних процесів, та кожний з них відбувається на відповідній частоті. При визначенні показників надійності в даній роботі використовувалась схематизації процесу випадкових коливань. Вважається, що випадковий процес зміни напружень, який визначено в даній роботі можна

схематично замінити на вузькосмуговий процес, що є еквівалентним за пошкоджуючим впливом на конструкцію. У якості критеріїв еквівалентності використовується рівність щільності ймовірності амплітуд напружень для схематизованого процесу і процесу, що розрахований при вирішенні задачі випадкових коливань, а частота схематизованого процесу може бути визначена за формулою [19]:

$$\omega_e = \left(\frac{\sum_{j=1}^m \omega_j^2 \sigma_{y_j}^2}{\sum_{j=1}^m \omega_j^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{24a}$$

Таблиця 2 Значення ефективних частот при різних типах навантаження

Швидкість, км/год	Вид покриття	
	Асфальтне	Булижникове
50	52,1 Гц	106,8 Гц
90	32,33 Гц	72,3 Гц

Для вирішення даної задачі, виділимо нову змінну та її похідну:

$$z(t) = 1 - (1-D)^{m+1}, \tag{25}$$

$$\frac{d}{dt} z(t) = (m+1)(1-D)^{m+1} \frac{d}{dt} (1-D). \tag{26}$$

Виразимо похідну D через нову змінну:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{1}{(m+1)(1-D)^m}, \tag{27}$$

$$z = \int_0^t B \sigma_a^m(\tau) d\tau. \tag{28}$$

В задачі, що вирішується σ_a випадково змінюються у часі, в наслідок випадкових коливань, але з відомими ймовірнісними характеристиками. Вважаємо, що процес стаціонарний, напруження підпорядковуються закону Гауса та є випадковим процесом, тому амплітуди напружень мають підпорядковуватись закону Релея [20].

Для визначення математичного очікування та дисперсії $z(t)$ треба усереднити інтеграл (28):

$$\langle z \rangle = \left\langle \int_0^t B \sigma_a^m(\tau) d\tau \right\rangle = B \langle \sigma_a^m \rangle t = k_1 t, \tag{29}$$

$$\langle \sigma_a^m \rangle = \int_0^\infty \frac{\sigma_a^{m+1}}{\sigma_\sigma^2} \exp\left(-\frac{\sigma_a^2}{2\sigma_\sigma^2}\right) d\sigma_a. \tag{29a}$$

Дисперсія знаходиться через кореляційну функцію $z(t)$ при $t_1 = t, t_2 = t$.

$$\sigma_z^2 = K_z(t_1 = t, t_2 = t). \tag{30}$$

У свою чергу кореляційна функція за визначенням виражається через другий початковий момент:

$$K_z = \langle z(t_1) \cdot z(t_2) \rangle - \langle z(t_1) \rangle \cdot \langle z(t_2) \rangle = \langle z(t_1) \cdot z(t_2) \rangle - k_1 t_1 t_2. \quad (31)$$

З урахуванням (31) отримаємо:

$$\langle z(t_1) \cdot z(t_2) \rangle = B \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} \langle \sigma_a^m(\tau_1) \cdot \sigma_a^m(\tau_2) \rangle d\tau_1 d\tau_2. \quad (32)$$

Розглянемо окремо підінтегральний вираз (32), який являє собою кореляцію амплітуд напружень в степені m . Відповідно до визначення кореляційного моменту:

$$\langle \sigma_a^m(\tau_1) \cdot \sigma_a^m(\tau_2) \rangle = \int_0^\infty \int_0^\infty \sigma_{a_1}^m \cdot \sigma_{a_2}^m \cdot f_{\sigma_a}(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2}, \tau) d\sigma_{a_1} d\sigma_{a_2}, \quad (33)$$

де, $\tau = \tau_1 - \tau_2$, а $f_{\sigma_a}(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2}, \tau)$ це двомірна функція щільності ймовірності амплітуд напружень як стаціонарного випадкового процесу, яка в свою чергу дорівнює:

$$f_{\sigma_a} = f(x_1) f(x_2) \left[1 + R(\tau) \cdot \left(1 - \frac{x_1^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) \left(1 - \frac{x_2^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) \right], \quad (34)$$

де для спрощення запису введено $\sigma_a(\tau_1) = x_1$ та $\sigma_a(\tau_2) = x_2$, а також $R(\tau)$ це коефіцієнт кореляції випадкової зміни напружень, який дорівнює:

$$R(\tau) = e^{-\alpha\tau}, \quad (35)$$

де α - це коефіцієнт затухання кореляційно функції.

З урахуванням (34) перепишемо вираз (33):

$$\begin{aligned} \langle \sigma_a^m(\tau_1) \cdot \sigma_a^m(\tau_2) \rangle &= \int_0^\infty \int_0^\infty x_1^m \cdot x_2^m \cdot f(x_1) f(x_2) + \\ &+ x_1^m \cdot x_2^m R(\tau) \cdot \left(1 - \frac{x_1^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) \left(1 - \frac{x_2^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) dx_1 dx_2 = \\ &= \left(\int_0^\infty x_1^m \cdot f(x_1) dx_1 \right)^2 + \\ &+ \left(\int_0^\infty x_2^m \cdot f(x_2) \left(1 - \frac{x_2^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) dx_2 \right)^2 R(\tau) = \\ &= I_1^2 + I_2^2 R(\tau). \end{aligned} \quad (36)$$

Знайдемо значення отриманих інтегралів через гамма-функцію Ейлера:

$$I_1 = \int_0^\infty \sigma_{a_1}^m \cdot f(\sigma_{a_1}^m) d\sigma_{a_1} = \sigma_\sigma^m 2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right), \quad (37)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_0^\infty \sigma_{a_1}^m \cdot f(\sigma_{a_1}^m) \left(1 - \frac{\sigma_{a_1}^2}{2\sigma_\sigma^2} \right) d\sigma_{a_1} = \\ &= \sigma_\sigma^m 2^{\frac{m}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right). \end{aligned} \quad (38)$$

Після підстановки (35) та (36) у (34) отримаємо наступне:

$$\langle \sigma_a^m(\tau_1) \cdot \sigma_a^m(\tau_2) \rangle = k_2 + k_3 R(\tau), \quad (39)$$

де k_2 та k_3 константи, що дорівнюють:

$$k_2 = \sigma_\sigma^{2m} 2^m \Gamma^2\left(\frac{m}{2} + 1\right), \quad (40)$$

$$k_3 = \sigma_\sigma^{2m} 2^m \left[\Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{m}{2} + 2\right) \right]^2. \quad (41)$$

З отриманих результатів видно, що коефіцієнти k_2 та k_3 виражається через k_1 :

$$k_2 = \frac{k_1^2}{\psi^2}; \quad k_3 = \frac{m^2}{4} k_1^2. \quad (41a)$$

Наступним кроком є визначення коефіцієнту кореляції з формули (32) з урахуванням (39)-(41):

$$\langle z^m(t_1) \cdot z^m(t_2) \rangle = B \omega_e \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} (k_2 + k_3 R(\tau)) d\tau_1 d\tau_2. \quad (42)$$

Позначмо інтеграл від коефіцієнту кореляції, як A :

$$A = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} R(\tau) d\tau_1 d\tau_2 = \int_0^{t_1} \int_0^{t_2} e^{-\alpha|\tau_2 - \tau_1|} d\tau_1 d\tau_2. \quad (43)$$

Оскільки для подальших розрахунків потрібна, не кореляційна функція, а дисперсія то A слід обчислити з урахуванням того, що $t_1 = t_2 = t$:

$$A|_{t_1=t_2=t} = \frac{2(-1 + e^{-\alpha t} + \alpha t)}{\alpha^2}. \quad (44)$$

Вираз (44) можна спростити з урахуванням того, що у нашому випадку час t відповідає ресурсу конструкції, що вимірюється роками (та у даному випадку задається у секундах). Це призводить до того, що доданком $e^{-\alpha t}$ та 1 можна знехтувати у порівнянні з часом t . Отже, вираз (44) буде мати такий вигляд:

$$A|_{t_1=t_2=t} = \frac{2t}{\alpha}. \quad (45)$$

Отже дисперсію $z(t)$, відповідно до (31) з урахуванням (41a) та (45) тепер можна знайти за такою формулою:

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= K_z(t_1 = t, t_2 = t) = \psi^2 k_3 A|_{t_1=t_2=t} = \\ &= \psi^2 k_3 \frac{2t}{\alpha} = \frac{k_1^2 t m^2}{2\alpha}, \end{aligned} \quad (46)$$

де ψ - це константа, яка виражається через параметри кривої Веллера.

Використовуючи зв'язок між процесом $z(t)$ та пошкоджуваністю (28), щільність розподілу ймовірностей пошкоджуваності має такий вигляд:

$$f_D(D, t) = f_u(z(t), t) \left| \frac{dz}{dt} \right|, \quad (48)$$

$$f_D = \frac{(m+1)(1-D)^m}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2(t)}} \exp\left(-\frac{(1-(1-D)^{m+1} - \langle z(t) \rangle)^2}{2\sigma_z^2(t)}\right). \quad (49)$$

Математичне очікування:

$$\langle D \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} D f_D(D, t) dD. \quad (50)$$

Імовірність безвідмовної роботи зазначається за такою формулою:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f_D(D, t) dD. \quad (51)$$

Таким чином були отримані ймовірнісні характеристики накопичення втомних пошкоджень в процесі експлуатації. Ці результати можна використати для оцінки ймовірнісних характеристик часу до відмови як випадкової величини.

За формулою (50) була визначена середня пошкоджуваність при різних типах навантаження.

Отримане математичне очікування пошкоджуваності (рис. 9) відображає процес накопичення пошкоджуваності в залежності від часу. Середній ресурс при русі 50 км/год дорівнює 2,1 роки, а при русі 90 км/год 5,7 років. За отриманою ймовірністю безвідмовної роботи (рис. 10) визначається гарантований ресурс, який у випадку руху при швидкості 90 км/год має значення 5 років, а на швидкості 50 км/год – 2 роки. У випадку при русі по асфальтному покритті значення ресурсу набагато більші за звичайний термін експлуатації.

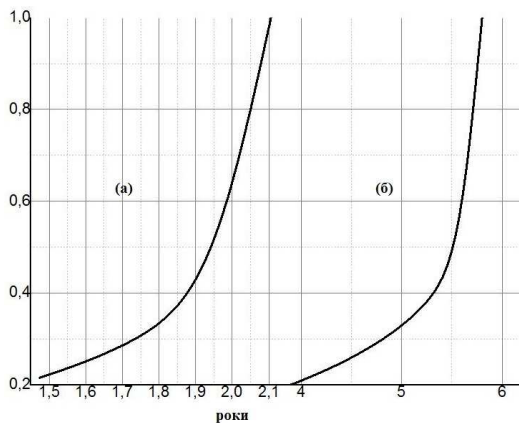


Рис. 9 – Середня пошкоджуваність конструкції при швидкості 50 км/год (а) та 90 км/год (б) при русі по булижному покритті.

Висновки

У роботі визначені параметри надійності конструкції, такі як математичне очікування та вірогідність безвідмовної роботи. Визначено, що рух по булижному покритті більш небезпечний, ніж при русі по асфальтному покритті. При русі по булижному покритті гарантований ресурс при

швидкості 50 км/год більший у два рази ніж при русі 90 км/год.

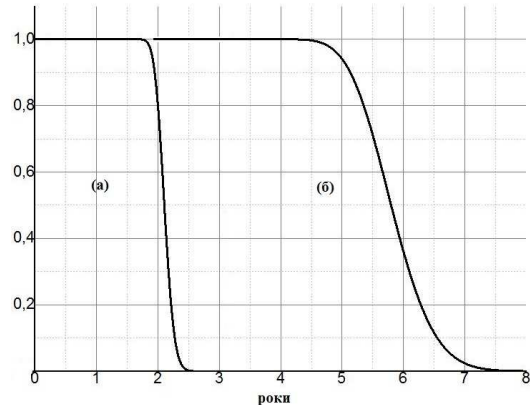


Рис. 10 – Імовірність безвідмовної роботи конструкції при швидкості 50 км/год (а) та 90 км/год (б) при русі по булижному покритті.

Список літератури

- 1 **Аврамов, М. В.** Разработка метода расчета несущих систем колесных машин при случайных стационарных колебаниях / **М.В Аврамов** – Саратов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»/ – 2009. – 17 с.
- 2 **Галимянов, И. Д.** Оценка усталостной долговечности кабин грузовых автомобилей расчетно–экспериментальным методом / **И. Д. Галимянов.** – Набережные Челны : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины». – 2009. – 16 с.
- 3 **Younesian, D.** Fatigue life estimation of MD36 and MD523 bogies based on damage accumulation and random theory / **D. Younesian, A. Solhmirzaei, A. Gachloo.** // *Journal of Mechanical science and technology.* – 2011. – 9 с.
- 4 **Шостак, Р. М.** Ризики виникнення пожеж під час експлуатації залізничних цистерн з пошкодженнями типу «вмятина» / **Р. М. Шостак** – Київ : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 21.06.02 – «пожежна безпека». – 2012. – 23 с.
- 5 **Мясницкий, Р. Н.** Разработка расчетных моделей и методов оценки работоспособности цистерн несущей конструкции / **Мясницкий Р. Н.** – М. : дис. кандидата тех. наук 05.05.04. – 2009. – 173 с.
- 6 **Hougaz, A. B.** Probabilistic Structural Analysis Applied To Spring Leaf Suspension Assembly Of Semi-Trailer Tank Vehicle / **A. B. Hougaz, C. A. N. Dias.** // *San Pauls :17th International Congress of Mechanical Engineering.* – 2003. – 8 с.
- 7 **Milan Saga** Simulation Of Vertical Vehicle Non-Stationary Random Vibrations Considering Various Speeds / **Milan Saga, Lenka Jakubovichova** // *Transport z.84.* – 2014. – 6 с.
- 8 **Dai, J.** Random displacement and acceleration responses of vehicles with uncertainty / **J. Dai, W. Gao, N. Zhang** // *Journal of Mechanical science and technology.* – 2011. – 8 с.
- 9 **Badi, H.** Sensitivity and reliability analysis of articulated heavy vehicle / **H. Badi, F. Bernardin, M. Bouteldja,**

- M. Fogli, C.H. Lamarque** // Leuven, Belgium *Eurodyn.* – 2011. – 9 с.
- 10 **Rouillard, V.** On the Non-Gaussian Nature of random vehicle vibrations / **V. Rouillard.** // *Progressing of the world congress on engineering Vol II*, London U.K. – 2007. – 6 с.
- 11 **Li-Xin Guo** Vehacle Vibration Analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation / **Li-Xin Guo, Li-Ping Zhang** // *Mathematical Problems in Engineering.* – 2009. – 9 с.
- 12 **Жовдак, В. А.** Виброизмерения рам тележек вагонов метрополитена в эксплуатационных условиях / **В. А. Жовдак, А. Б. Белоцерковский, М. М. Смирнов, Ю. Н. Ульянов, С. И. Яцько, О. В. Черных** // *Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Динамика та міцність машин.* – 2007. – №22.
- 13 **Дименберг, Ф. М.** Вибрации в технике, т.3. / **Ф. М. Дименберг, К. С. Колесников** // Москва «Машиностроение». – 1980. – 545 с.
- 14 Автоцистерны для перевозки светлых нефтепродуктов. режим доступа: // http://www.oriond.sumy.ua/avtoci stern_neft_ru.html, 1992-2012
- 15 **Ларин, А. А.** Прогнозирование и анализ надежности машиностроительных конструкций / **А. А. Ларин** – Х.: НТУ «ХПИ». – 2011. – 132 с.
- 16 **Ричардс, Р. Б.** Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин / **Р. Б. Ричардс** – Р. «Зинатне». – 1988. – 282 с.
- 17 **Ларін, О. О.** Коливання двовісної автоцистерни з урахуванням ефекту запізнення випадкового збурення / **О. О. Ларін, К. Є. Грінченко** // *Вісник НТУ «ХПИ»: серія «Динамика та міцність машин».* – 2014. – № 58. – С. 44-60.
- 18 **Larin, O. O.** The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation / **O. O. Larin, O. I. Trubayev, O. O. Vodka** . – *Вестник ПНИМУ «Механика».* – №1. – 2014. – С. 167-193.
- 19 **Жовдак, В. А.** Розробка методів прогнозування надійності елементів машинобудівних конструкцій при випадкових коливаннях : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.09 / **В. А. Жовдак**; Харківський держ. політехнічний ун-т. – Х., 1996. – 47 с.
- 20 **Жовдак, В. А.** Прогнозирование надежности механических систем / **В. А. Жовдак, Л. Ф. Тарасова** // Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – 107 с.
- 4 **Shostak, R. M.** Risk of fire during the operation of railway tanks with injuries such as "dent" – Kyiv: Author. Thesis. on soyskanye scientific. Steps candidate. Sc. sciences specials. 21.06.02 – "Fire Safety". – 2012. – 23 p.
- 5 **Myasnitskiy, R. N.** The development of computational models and methods for assessing performance tank support structure dis. those candidate – Sciences 05.05.04 – Moscow. – 2009. – 173 p.
- 6 **Hougaz, A. B., Dias, C. A. N.** Probabilistic Structural Analysis Applied To Spring Leaf Suspension Assembly Of Semi-Trailer Tank Vehicle – *Sas Pauls :17th International Congress of Mechanical Engineering.* – 2003. – 8 p.
- 7 **Saga Milan, Jakubovichova Lenka** Simulation Of Vertical Vehicle Non-Stationary Random Vibrations Considering Various Speeds – *Transport z.84.* – 2014. – 6 p.
- 8 **Dai, J., Gao, W., Zhang, N.** Random displacement and acceleration responses of vehicles with uncertainty. *Journal of Mechanical science and technology.* – 2011. – 8 p
- 9 **Badi, H., Bernardin, F., Bouteldja, M., Fogli, M., Lamarque, C. H.** Sensitivity and reliability analysis of articulsted heavy vehicle. – Leuven, Belgium *Eurodyn.* – 2011. – 9 p.
- 10 **Rouillard, V.** On the Non-Gaussian Nature of random vehicle vibrations. *Progressing of the world congress on engineering Vol II*, London U.K. – 2007. – 6 p.
- 11 **Li-Xin Guo, Li-Ping Zhang** Vehacle Vibration Analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation. *Mathematical Problems in Engineering.* – 2009. – 9 p.
- 12 **Zhovdak, V. A., Belotserkovskii, A. B., Smirnov, M. M., Ulyanov, Y. U., Yatsko, S. I., Black, O. V.** Vibration measurements bogie frames subway cars under operating conditions. *Collection of scientific works "Vestnik NTU" KPI " : Dinamika that mitsnist machines.* – 2007. – №22.
- 13 **Dimenberg, F. M., Kolesnikov, K. S.** Vibrations in technique vol.3. – Moscow "Engineering". – 1980. – 545 s.
- 14 Tankers for the transport of light petroleum products. access mode// http://www.oriond.sumy.ua/avtoci stern_neft_ru.html 1992-2012
- 15 **Larin, A. A.** Prediction and reliability analysis of engineering structures – *Kh.: NTU "KPI"*. – 2011. – 132 s.
- 16 **Richards, R. B.** The finite element method in the theory of shells and plates – R. "Zinatne". – 1988. – 282 s.
- 17 **Larin, O. O., Grinchenko, K.** Oscillations dvovisnoi Tanker trucks s urahuvannyam efekta zapiznennya vipadkovogo zburennya. *Vestnik NTU "KhPI": seriya "Dinamika that mitsnist machines."* – 2014. – № 58. – S. 44-60.
- 18 **Larin, O. O., Trubayev, O. I., Vodka, O. O.** The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation. – *Вестник ПНИМУ «Механика».* – №1. – 2014. – С. 167-193.
- 19 **Zhovdak, V. A** . Development of methods for prediction of reliability of engineering structures under random vibrations: Author. dis ... Dr. Sc. Sciences: 05.02.09; Kharkiv State. Polytechnic University. – H., 1996. – 47 s.
- 20 **Zhovdak, V. A., Tarasova, L. F.** Predicting the reliability of mechanical systems. *Kharkov. NTU "KPI"*. – 2007. – 107 s.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Avramov, M. V.** Development of a method for calculating bearing systems-wheeled vehicles with stationary random vibrations – Saratov: author. dis. for obtaining scientific. Candidate stage. tehn. Sciences: 01.02.06 spec. "Dynamics and strength of machines, devices and equipment". – 2009. – 17 s.
- 2 **Galimyanov, I. D.** Assessment of fatigue life truck cabins of methods to assess – Naberezhnye Chelny : Author. dis. for obtaining scientific. Candidate stage. tehn. Sciences: spec. 05.05.03 "Wheeled and tracked vehicles". – 2009. – 16 p.
- 3 **Younesian, D., Solhmirzaei, A., Gachloo, A.** Fatigue life estimation of MD36 and MD523 bogies based on damage accumulation and random theory / *Journal of Mechanical science and technology.* – 2011. – 9 p.

Надійшла (received) 28.06.2015

УДК 620.92

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ

А. В. ФРОЛОВ

ЦЗФО, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА
email: frolov_a@inbox.ru

АННОТАЦИЯ Презентована стаття присвячена аналізу та оцінці ефективності перетворення сонячної енергії колекторами, які вигідно відрізняються від традиційних кремнієвих сонячних батарей істотно більшими ККД. Залежно від рівня сонячної інсоляції ККД колекторів становлять від 40 до 80%, а максимальні ККД кремнієвих панелей не перевищують 17-20%. На основі рівняння енергетичного балансу визначені фактори, що визначають ефективність перетворення колекторами енергії сонячного потоку в теплову. Показано, що потік оптимальних значень цих факторів доцільно виконувати застосовуючи методики багатфакторної оптимізації.

Ключові слова: сонячний колектор, інсоляція, площа колектора, коефіцієнт корисної дії, термодинамічні параметри, оптимізація.

АННОТАЦИЯ Представленная статья посвящена анализу и оценке эффективности преобразования солнечной энергии коллекторами, которые выгодно отличаются от традиционных кремниевых солнечных батарей существенно большими КПД. В зависимости от уровня солнечной инсоляции КПД коллекторов составляют от 40 до 80 %, а максимальные КПД кремниевых панелей не превышают 17-20 %. На основе уравнения энергетического баланса определены факторы, определяющие эффективность преобразования коллекторами энергии солнечного потока в тепловую. Показано, что поток оптимальных значений этих факторов целесообразно выполнять применяя методики многофакторной оптимизации.

Ключевые слова: солнечный коллектор, инсоляция, площадь коллектора, коэффициент полезного действия, термодинамические параметры, оптимизация.

EVALUATION EFFECTIVENESS OF TRANSFORMATION LUMINOUS FLUX OF SOLAR COLLECTORS

A. FROLOV

Center for correspondence courses, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the article conducted evaluation effectiveness of transformation luminous flux of solar collectors. The purpose for optimize operation of the solar collector is to increase its efficiency, and this should improve the efficiency of absorption of solar emission and reduce heat loss. Maximum efficiency is achieved between when the temperature absorber difference and the environment and the thermal losses are zero. Presented article analyzes the efficiency of conversion solar energy by collectors that compares favorably from the traditional silicon solar cells significantly greater coefficient of efficiency. Depending on the level of insolation collector efficiency ranged from 40 to 80%, and the maximum efficiency of silicon panels does not exceed 17-20%. On the basis of the energy balance equation we identified the factors that determine the conversion efficiency of energy of solar flux by collectors. Also, in the presented article we show that the flow of optimal values of these factors it is advisable to perform the technique using multivariate optimization. Taking into account the statistical data for the last 30 years defined operating modes of (air temperature and the level of solar insolation) collectors at different times of the year for the Kharkiv region. Thus we determined: calculation of the effectiveness is advisable to perform using a multi-factor mathematical model by multi-criteria optimization; the most efficient mode of operation of solar collectors are modes with minimum difference between the ambient temperature and the temperature of absorber. During selecting and designing the collector arrays for year-round operation modes of the solar installation, you must take into account the difference in the maximum and minimum levels of solar insolation. At the same time, the efficiency of the vacuum collectors is less dependent on ambient temperature changes than using flat collectors.

Keywords: solar collector, insolation, collector area, coefficient of efficiency, thermodynamic parameters, optimization.

Введение

В настоящее время для целей теплоснабжения интенсивно расходуются органические виды топлива, не смотря на то, что в современном мире их использование связано с рядом проблем: постоянный рост цен, зависимость от поставок, высокие

эксплуатационные затраты на оборудование, загрязнение окружающей среды.

По прогнозам ученых-аналитиков, после исчерпания на Земле органических видов топлива (нефти, газа и угля) наибольшим источником энергии для человечества останется Солнце, которое прослужит цивилизации, по меньшей мере, 3-4 млрд. лет. И еще одна цифра - годовое количество энергии,

поступающей от Солнца, почти в 15 тыс. раз превышает количество энергии, расходуемой населением Земли для обеспечения всей хозяйственной деятельности. По сравнению с этим потенциалом имеющиеся в нашем наличии ресурсы полезных ископаемых и ядерные энергетические источники кажутся незначительными. Вся потребность человечества в энергии на 180 лет вперед может быть обеспечена солнечной энергией, которая достигает Земли только за один день. В численном выражении Солнце посылает Земле ежедневно 960 миллиардов киловатт энергии.

Поэтому все больше внимания уделяется использованию нетрадиционных источников энергии, к которым относятся гелиосистемы.

В последнее время наиболее распространенным является вариант использования солнечных устройств на основе гелиоколлекторов. При этом акцент сделан на создание энергетических комплексов, включающих как традиционное котельное оборудование, так и гелиоколлекторы.

Как правило, степень нагрева в гелиоколлекторах (в наиболее совершенных конструкциях при хороших метеоусловиях) не превышает 70-80 °С. При снижении уровня инсоляции наблюдается снижение эффективности нагрева теплоносителя, что приводит к необходимости ввода в эксплуатацию котельного оборудования.

С помощью систем солнечных коллекторов при стандартном расчете потребности можно покрывать около 60% потребности в теплой воде жилого дома, рассчитанного на одну/две семьи. В теплый период, который составляет полгода, за счет солнечной энергии можно покрывать почти всю потребность в тепловой энергии.

Системы солнечных коллекторов наряду с функцией подогрева воды за счет использования солнечной энергии предназначены также для нагрева воды, используемой в отопительных системах.

Гелиоустановка практически не требует обслуживания и представляет собой инвестиции в будущее с четко просчитываемой окупаемостью.

Как отмечается в [1, 2] при постоянном росте цен на энергосистемы очень выгодным становится использование солнечных коллекторов для теплоснабжения фермерских домов. В этом случае гелиоустановки могут обеспечить потребности частного дома фермера в энергии для подогрева воды и частного отопления.

Солнечные установки для нагрева воды являются «экологически выгодной» альтернативой традиционным системам, они надежны и удобны в обслуживании, а главное – дают возможность экономить традиционные энергоресурсы. На подогреве воды можно экономить до 50-60% за год, а в летние месяцы экономия может достигать до 85-90%.

Цель работы

Целью работы является анализ и оценка эффективности преобразования солнечной энергии коллекторами, которые выгодно отличаются от традиционных кремниевых солнечных батарей существенно большими КПД.

Изложение основного материала

Главными элементами установки с солнечными коллекторами являются коллектор и аккумулятор, а также теплообменник, механизмы для циркуляции теплоносителя, автоматические устройства и регуляторы [1, 3].

Схема установки горячего водоснабжения с солнечными коллекторами показана на рис.1

1 - коллектор; 2 - воздухоотводчик; 3 - датчик температуры коллектора; 4 - система управления солнечными коллекторами; 5 - насосно арматурная группа; 6 - датчик температуры водонагревателя устройства регулирования гелиосистемы; 7 - кран для подпитки и слива; 8 - бивалентный водонагреватель; 9 - котел на жидком топливе или газе с автоматикой; 10 - датчик температуры водонагревателя от системы отопления.

Математическую модель солнечного коллектора представляем уравнением теплового баланса, формулами для определения коэффициента полезного действия коллектора и для вычисления площади поглощающей поверхности коллектора.

Уравнение теплового баланса для солнечного коллектора:

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8. \quad (1)$$

Поток тепла, уносимый теплоносителем к аккумулятору тепла для системы горячего водоснабжения или в систему отопления (полезная тепловая мощность):

$$q_3 = q_1 + q_2 - q_4 - q_5 - q_6 - q_7 - q_8, \quad (2)$$

где q_1 - тепловой поток прямого солнечного излучения, Вт/с; q_2 - тепловой поток рассеянного солнечного излучения, Вт/с; q_3 - тепловой поток, уносимый теплоносителем для горячего водоснабжения или отопления, Вт/с; q_4 - потери тепла с отраженным солнечным излучением, Вт; q_5 - тепловые потери через заднюю и боковые стенки солнечного коллектора (вследствие теплопроводности), Вт; q_6 - потери тепла вследствие конвекции, Вт; q_7 - потери тепла в результате теплового излучения абсорбера, Вт; q_8 - потери тепла в результате теплового излучения защитного стекла, Вт.

Основная характеристика коллектора — коэффициент полезного действия η . Он показывает какая доля солнечного излучения, падающего на

коллектор, может быть преобразована в полезную тепловую мощность.

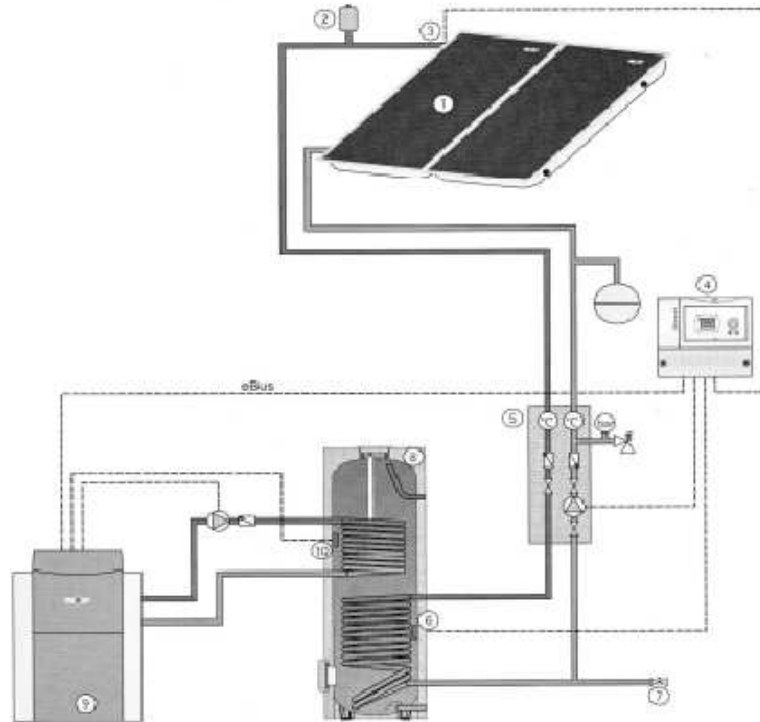


Рис.1 – Схема установки горячего водоснабжения с солнечными коллекторами

где 1 - коллектор; 2 - воздухоотводчик; 3 - датчик температуры коллектора; 4 - система управления солнечными коллекторами; 5 - насосно арматурная группа; 6 - датчик температуры водонагревателя устройства регулирования гелиосистемы; 7 - кран для подпитки и слива; 8 - бивалентный водонагреватель; 9 - котел на жидком топливе или газе с автоматикой; 10 - датчик температуры водонагревателя от системы отопления.

В физическом смысле КПД выражает отношение «полезной» тепловой энергии, отведенной от абсорбера с помощью циркулирующего через коллектор теплоноситель, к падающей на абсорбер суммарной лучистой энергии.

$$\eta = \frac{q_3}{q_1 + q_2} \quad (3)$$

Для определения КПД коллектора используется формула [7]:

$$\eta = \frac{\eta_0 - (k_1 - \Delta T)}{E - \frac{(k_2 - \Delta T)^2}{E}} \quad (4)$$

где η_0 - оптический коэффициент полезного действия коллектора; k_1 и k_2 - коэффициент тепловых потерь; $\Delta T = (T_n - T_o)$; T_n - температура поглотителя, K ; T_o - температура окружающей среды; E - интенсивность облучения, Вт/м².

Оптический КПД равен произведению пропускной способности стекла и поглощательной способности абсорбера при ($\eta_0 = \eta_0$ при $\Delta T = 0$).

Потери тепла при работе коллектора рассчитываются по коэффициентам тепловых потерь k_1 и k_2 и по разности температур между поглотителем и окружающей средой.

КПД коллектора зависит также от его рабочего состояния. Необходимо учитывать, что КПД коллектора изменяет свое значение в зависимости от температуры окружающей среды, а также от величины падающего излучения [8].

Энергоотдача гелиоустановки зависит от наклона и ориентации поверхности коллектора. При наклонной поверхности поглощения изменяется угол инсоляции, интенсивность облучения, и, как результат, количество поступающей энергии. Это количество энергии максимально, если излучение попадает на поверхность поглощения под прямым углом [9]. Такой случай в наших широтах не может быть достигнут, поэтому энергоотдачу можно оптимизировать путем наклона поверхности поглощения.

Другим критерием для расчет ожидаемого количества энергии является ориентация поверхности поглощения. В северном полушарии оптимальной является ориентация на юг. Зона оптимальной энергоотдачи гелиоустановки находится между юго-востоком и юго-западом, а также при углах наклона от 25 до 70 градусов. Более значительные отклонения,

например при монтаже на фасаде, могут быть компенсированы соответствующим увеличением площади коллектора. Требуется также предотвращать затенение поверхности поглощения.

Целью оптимизации работы солнечного коллектора является увеличение его КПД, а для этого необходимо повышать эффективность поглощения солнечного излучения и уменьшать потери тепла. Максимальный КПД достигается в том случае, если разность между температурой поглотителя и окружающей средой ΔT и термические потери равны нулю [11].

Как следует из уравнения (1) для оценки эффективности солнечных коллекторов требуется учет как минимум восьми параметров (факторов).

Поэтому в работе [1, 2] для решения этой задачи предложено применять методы многофакторной оптимизации. При этом для оптимизации термодинамических характеристик процесса нагрева воды с помощью солнечного коллектора предложена функциональная математическая модель солнечного коллектора. Эта модель представляет солнечный коллектор в виде динамической системы, осуществляющей преобразование входных возмущающих и управляющих воздействий в выходные переменные параметры (рис. 2)

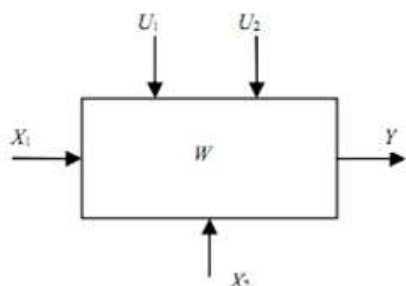


Рис. 2 – Солнечный коллектор

где U_1 – управляющий вектор прямого солнечного излучения;

U_2 – управляющий вектор рассеянного в атмосфере солнечного излучения;

X_1 – входной вектор условий нагрева теплоносителя;

X_2 – входной вектор потерь тепла;

Y – выходной вектор теплоносителя.

Однако на первом этапе исследований для получения экспресс-оценок с приемлемой степенью точности (погрешность не более 3-4%) целесообразно воспользоваться руководством по проектированию солнечных коллекторов компании Vaillant [3, 4], которое подготовлено с учетом статистической обработки большого количества экспериментальных данных.

Для этого, прежде всего, нужно оценить потребность m в горячей воде с учетом количества потребителей (жильцов дома или коттеджа) и индивидуального суточного потребления. Тогда

необходимое количество тепла Q можно рассчитать по формуле:

$$Q = m \cdot \Delta T \cdot 1.163 \text{ (Вт·час/день)},$$

где ΔT – разница температур между требуемой температурой воды и температурой холодной воды (+15°C); 1,163 – коэффициент для перевода единиц измерения (из Джоулей в Вт·час).

Как уже отмечалось, для дальнейших расчетов необходимо определить уровень инсоляции и среднемесячной температуры в зависимости от времени года.

Для Харьковского региона эти сведения представлены с помощью [5] в виде табл. 1, рис. 3 и табл. 2.

Таблица 1 – Уровень инсоляции в зависимости от времени года.

Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46
Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноя.	Дек.
5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9
Среднее значение = 3,26					

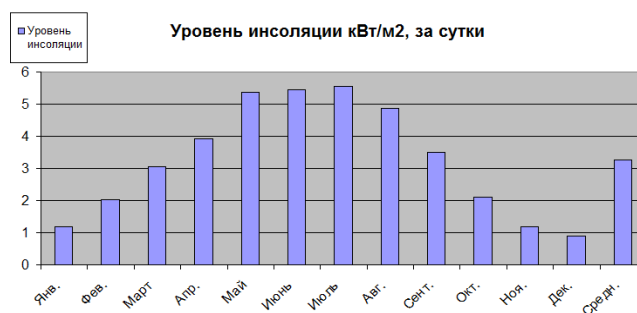


Рис. 3 – Ежемесячный усредненный случай облучения солнцем на горизонтальной поверхности для города Харьков (кВт/м² за день)

Из рис. 3 видно, что минимальный уровень инсоляции наблюдается в декабре, а максимальный – в июле месяце, и превышает минимальный практически в 6 раз. Это создает определенные трудности при выборе коллекторных панелей для круглогодичной эксплуатации солнечной установки [6].

Производитель солнечных коллекторов Valliant приводит в руководстве по проектированию [3, 4] зависимость эффективности (КПД) плоских (auroTHERM VFK145H/V, auroTHERM plus VFK 150H/V) и вакуумных (auroTHERM exclusive VTK 570/2und 1140/2) солнечных коллекторов от разности температур между окружающей средой и коллектором (рис. 4). Из графика можно сделать вывод, что КПД вакуумных коллекторов меньше зависит от перепада температур «окружающая среда-коллектор», чем в случае плоских коллекторов.

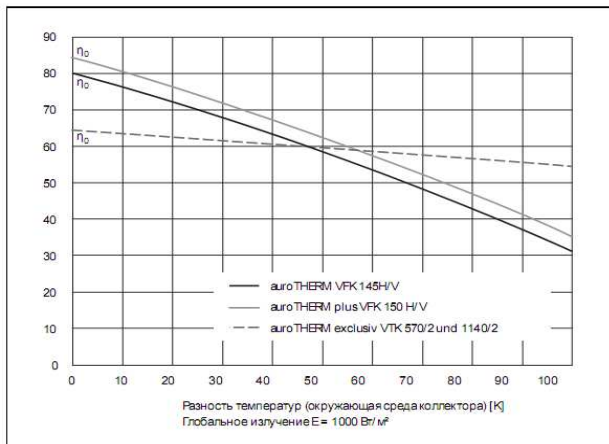


Рис.4 – Зависимость КПД от разности температур в коллекторе и окружающей среде

Для расчета средней эффективности коллекторов для нагрева воды (до 50°C) используя зависимость КПД от разности температур (рис. 2) и среднемесячную температуру для Харькова (табл. 2) можно определить среднее значение КПД в каждом месяце для г. Харькова (рис. 5).

Таблица 2 – Распределение температур по месяцам года для г. Харькова (по статистическим данным за период 1981-2010 год)

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь
Абсолютный максимум, °C	11,0	14,6	21,8	30,5	34,5	36,8
Средняя температура, °C	-4,6	-4,5	0,7	9,2	15,6	19,3
Абсолютный минимум, °C	-35,6	-29,8	-32,2	-11,4	-1,9	2,2
Показатель	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Абсолютный максимум, °C	37,6	39,8	33,7	29,3	20,3	13,4
Средняя температура, °C	21,3	20,3	14,4	7,9	0,9	-3,5
Абсолютный минимум, °C	5,7	2,2	-2,9	-9,1	-20,9	-30,8
Показатель	Год					
Абсолютный максимум, °C	39,8					
Средняя температура, °C	8,1					
Абсолютный минимум, °C	-35,6					

Несмотря на то, что плоские солнечные коллекторы обладают высокой эффективностью при средних температурах (рис. 2), необходимо также учитывать, что они обладают сравнительно низким КПД при очень низких температурах (при -35,6°C

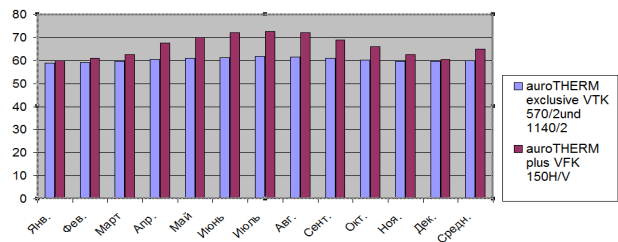


Рис. 5 – КПД коллекторов для каждого месяца в г. Харькове (плоские – auroTHERM plus VFK 150H/V и вакуумные – auroTHERM exclusive VTK 570/2und 1140/2)

КПД будет составлять примерно 44% согласно рис.1). Поэтому их применение нецелесообразно в зимнее время, когда преобладают отрицательные температуры.

Далее определим средний уровень поглощаемого излучения для каждого коллектора, для чего вычислим среднюю инсоляцию и средний КПД для каждого сезона:

Таблица 3 – Распределение по временам года средней инсоляции, температуры и средних КПД вакуумных и плоских коллекторов.

Время года	Зима	Лето	Осень
Средняя инсоляция, Вт/м ²	1370	5300	2260
Средняя температура, °C	-4,2	20,3	7,73
Среднее КПД вакуумных коллекторов, %	59	61,5	60,5
Среднее КПД плоских коллекторов, %	61	72	67

Определим необходимую площадь для каждого типа коллектора для каждого сезона по формуле:

$$S_{koll} = \frac{0,95 \cdot S_D \cdot Q_v}{S_N \cdot Q_v} = 0,95 \frac{S_D}{S_N \cdot \eta}, \quad (5)$$

S_D – степень покрытия энергозатрат за счет гелиоустановки;

S_N - степень использования гелиосистемы;

Q_v – потребление энергии (Квт·ч/год);

Q_E – инсоляция на м2 наклонной поверхности (Квт·ч/м2·год)

При установке коллектора на юг угол наклона соответствует широте установки. Для Харьковского региона при круглогодичной эксплуатации целесообразно выбирать угол наклона 45°.

С учетом рекомендаций [13] принимаем $S_D=1.0$ и $S_N=0.3$

С помощью формулы (5) и найденных средних КПД для каждого типа коллектора, условий эксплуатации

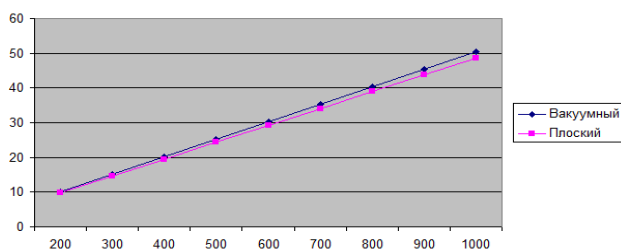
зимой, летом и осенью вычисляем их необходимую площадь.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

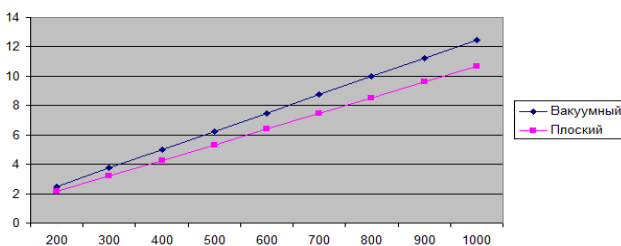
Таблица 4 – Необходимая площадь коллектора для каждого сезона

Потребн. л/день	Кол. тепла, Вт*час/день	Необходимая площадь, м ²					
		Зима		Лето		Осень	
		Вакуумные	Плоские	Вакуумные	Плоские	Вакуумные	Плоские
200	8141	10,07176	9,741534	2,497622	2,133386	5,95407	5,376436
300	12211,5	15,10763	14,6123	3,746434	3,200079	8,931105	8,064655
400	16282	20,14351	19,48307	4,995245	4,266771	11,90814	10,75287
500	20352,5	25,17939	24,35384	6,244056	5,333464	14,88518	13,44109
600	24423	30,21527	29,2246	7,492867	6,400157	17,86221	16,12931
700	28493,5	35,25114	34,09537	8,741678	7,46685	20,83925	18,81753
800	32564	40,28702	38,96614	9,990489	8,533543	23,81628	21,50575
900	36634,5	45,3229	43,8369	11,2393	9,600236	26,79332	24,19396
1000	40705	50,35878	48,70767	12,48811	10,66693	29,77035	26,88218

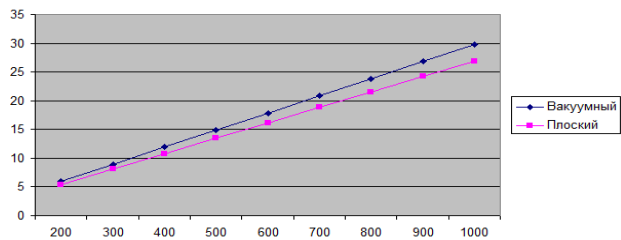
По данным таблицы 4 построены графики необходимой площади коллекторов (м²) в зависимости от расхода горячей воды (литр/день) для зимы (рис. 6, а), лета (рис. 6, б) и осени (рис. 6, в)



а)



б)



в)

Рис. 6 – Зависимость необходимой площади коллекторов (м²) от расхода воды (л/день)

На рис. 6 – а) в зимнее время; б) летнее время; в) в осеннее время (плоские – auroTHERM plus VFK 150H/V и вакуумные – auroTHERM exclusive VTK 570/2und 1140/2)

Подсчет количества энергии (табл. 4) показывает, что в зависимости от месяца использования для подогрева нужного количества воды, площадь коллекторов может существенно отличаться. При расчетах необходимого количества тепла для зимнего периода неизбежно возникает очень существенная проблема – утилизация тепла. Без ее решения вода в баке-аккумуляторе закипит, что может привести к выходу из строя оборудования [14].

Существует несколько способов решения подобной задачи:

– в зимнее время можно использовать дополнительно газовый котел для поддержания горячей воды;

– в летнее время лишнюю энергию целесообразно тратить на другие цели, например, отопление бассейна.

Таким образом, вопрос о реализации лишней энергии летом требует решения индивидуально каждым потребителем с учетом его личных интересов и возможностей.

Выводы

1. Расчет эффективности работы целесообразно выполнять используя многофакторную математическую модель методом многокритериальной оптимизации.
2. Наиболее эффективными режимами работы солнечных коллекторов являются режимы при минимальной разности температуры окружающей среды и поглотителя.
3. При выборе и проектировании коллекторных панелей для режимов круглогодичной эксплуатации

солнечной установки необходимо учитывать перепад уровней максимальной и минимальной солнечной инсоляции. Следует заметить, что КПД вакуумных коллекторов меньше зависит от перепада температур окружающей среды, чем при использовании плоских коллекторов.

Список литературы

1. **Кряклина, И. В.** Разработка математической модели солнечного коллектора для теплоснабжения дома фермера / **И. В. Кряклина** // *Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве*, Минск. – 2012. – 310 с.
2. **Garg, H. P.** Solar Energy: Fundamentals and Applications / **H. P. Garg** // *Tata McGraw-Hill Education*. – 2000. – 434 p.
3. Руководство по проектированию солнечных коллекторов компании vaillant. www.vaillant.ua
4. **Kalogirou, A.** Solar Energy Engineering: Processes and Systems / **A. Kalogirou** // *Soteris Academic Press*. – 2009. – 744 p.
5. Пособие по проектированию и расчету геосистем esco-ecosys.narod.ru/2011_10/art133.pdf
6. **Kreith, F., Kreider, J. F.** Principles of Solar Engineering. / **F. Kreith, J. F. Kreider** // *Second Edition D. Yogi Goswami*, CRC Press. – 2000. – 706 p.
7. **Амерханов Р. А.** Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства. / **Р. А. Амерханов: под ред. Б. Х. Драганова.** // М.: Колос-пресс. – 2002. – 424 с.
8. **Захаров, А. А.** Применение теплоты в сельском хозяйстве / **А. А. Захаров** // М.: Агропромиздат. – 1986. – 288 с.
9. **Ачилов, Б. М.** Расчет температурного режима солнечного коллектора / **Б. М. Ачилов** // *Гелиотехника*. – 1980. – № 2. – С. 46 - 48.
10. **Mendes, J. F., Horta, P., Carvalho, M. J., Silva, P.** Solar Thermal Collectors in Polymeric Materials: A Novel Approach Towards Higher Operating Temperatures / **J. F. Mendes, P. Horta, M. J. Carvalho, P. Silva** // *Proceedings of ISES World Congress 2007* (Vol. I – Vol. V). – 2009. – P. 640-643.
11. **Папушин, Э. А.** Результаты исследований лучепоглощающих поверхностей солнечного коллектора / **Э. А. Папушин** // *Экология и сельскохозяйственная техника: Материалы второй научно-практической конференции*. Санкт-Петербург-Павловск. – 2000. – т. 3. – С. 156-158.
12. **Goetzberger, A.** Flat plate collector with bifacially irradiated absorber / **A. Goetzberger, M. Rommel, J. Dengler, V. Wittwer** // *Proceedings of the 4th International Workshop*. Birmingham: Franklin Company Consultants. – 1991. – P. 62-65.
13. **Klein, S. A.** Calculation of flat-plate collector utilizability. / **S. A. Klein** // *Solar energy*. – 1978. – vol. 21, no. 6. – P. 393-402.
14. **Валов, М. И.** Оптимальное значение площади солнечных коллекторов в системах теплоснабжения / **М. И. Валов** // *Гелиотехника*. М. – 1986. – № 1. – С. 33-39.

Bibliography (transliterated)

1. **Kryaklina, I. V.** Razrabotka matematicheskoy modeli solnechnogo kollektora dlya teplosnabzheniya doma fermera / **I. V. Kryaklina** // *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve*. – 2012. – 310 s.
2. **Garg, H. P.** Solar Energy: Fundamentals and Applications / **Tata McGraw-Hill Education. – 2000. – 434 s.**
3. Rukovodstvo po proektirovaniyu solnechnykh kollektorov kompanii vaillant. www.vaillant.ua
4. **Kalogirou, A.** Solar Energy Engineering: Processes and Systems / **Soteris Academic Press**. – 2009. – 744 p.
5. Posobie po proektirovaniyu i raschetu geliosistem esco-ecosys.narod.ru/2011_10/art133.pdf
6. **Kreith, F., Kreider, J. F.** Principles of Solar Engineering / *Second Edition D. Yogi Goswami*, CRC Press. – 2000. – 706 p.
7. **Amerkhanov, R. A.** Teploenergeticheskie ustanovki i sistemy sel'skogo khozyaystva. / **R. A. Amerkhanov: pod red. B. Kh. Draganova** // М.: Kolos-press. – 2002. – 424 s.
8. **Zakharov, A. A.** Primenenie teploty v sel'skom khozyaystve. – М.: Agropromizdat. – 1986. – 288 s.
9. **Achilov, B. M.** Raschet temperaturnogo rezhima solnechnogo kollektora / *Geliotekhnika*. – 1980. – № 2 – S. 46 - 48.
10. **Mendes, J. F., Horta, P., Carvalho, M. J., Silva, P.** Solar Thermal Collectors in Polymeric Materials: A Novel Approach Towards Higher Operating Temperatures. *Proceedings of ISES World Congress 2007* (Vol. I – Vol. V). – 2009. – P. 640-643.
11. **Papushin, E. A.** Rezul'taty issledovaniy luchepogloshchayushchikh poverkhnostey solnechnogo kollektora / *Ekologiya i sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: Materialy vtoroy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Sankt-Peterburg-Pavlovsk. – 2000. – t. 3. – S. 156-158.
12. **Goetzberger, A., Rommel, M., Dengler, J., Wittwer, V.** Flat plate collector with bifacially irradiated absorber / *Proceedings of the 4th International Workshop*. Birmingham: Franklin Company Consultants. – 1991. – P. 62-65.
13. **Klein, S. A.** Calculation of flat-plate collector utilizability / *Solar energy*. – 1978. – vol. 21, no. 6. – P. 393-402.
14. **Valov, M. I.** Optimal'noe znachenie ploshchadi solnechnykh kollektorov v sistemakh teplosnabzheniya / *Geliotekhnika*. Moscow. – 1986. – № 1. – S. 33-39.

Поступила (received) 15.05.2015

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

УДК 615.47

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ДОСТУПОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОГО АТЛАСА ВНУТРИМОЗГОВЫХ
СТРУКТУР

О. Г. АВРУНИН, М. Ю. ТЫМКОВИЧ*

Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков,
УКРАИНА

*email: maxim_tymkovich@ukr.net

АННОТАЦИЯ У роботі розглядаються питання, що стосуються можливості використання цифрових атласів внутрішньомозгових структур у системах передопераційного планування нейрохірургічних втручань. У роботі, у якості такого атласу використовується оцифрований атлас Талайраха, що міститься у об'ємі 141x172x110. Для урахування нечіткості у точному співставленні внутрішньомозгових структур запропоновано використання модифікованого методу по розрахунку інвазивності хірургічного доступу. При цьому використовується видозміна цифрового атласу, котра отримана шляхом розмиття бінарних даних у різних ризикових модальностях. Також продемонстровано розрахунок ризику хірургічного доступу на використовуваному атласі.

Ключові слова: нейрохірургія, атлас мозку, атлас Талайраха, стереотаксис, комп'ютерне планування

АННОТАЦИЯ В работе рассматриваются вопросы, которые касаются возможности использования цифровых атласов внутримозговых структур в системах предоперационного планирования нейрохирургических вмешательств. В работе, в качестве такого атласа используется оцифрованный атлас Талайраха, который содержится в объеме 141x172x110. Для учета нечеткости в точном сопоставлении внутримозговых структур предложено использование модифицированного метода по расчету инвазивности хирургического доступа. При этом используется измененная версия цифрового атласа, которая получена путем размывания бинарных данных на разных рисковомых модальностях. Также показан расчет риска хирургического доступа на используемом атласе.

Ключевые слова: нейрохирургия, атлас мозга, атлас Талайраха, стереотаксис, компьютерное планирование

OPTIMIZATION OF NEUROSURGICAL ACCESS USING THE DIGITAL ATLAS
OF INTRACEREBRAL STRUCTURES

O. AVRUNIN, M. TYMKOVYCH

Department of Biomedical Engineering, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Stereotactic brain surgery is the main method used in minimally invasive neurosurgery, especially in biopsy destruction or stimulation of deep brain structures. In combination with a variety of research methods such as tomography, stereotaxis effectively determines the trajectory of surgical approach and makes minimally invasive interventions. The aim of this paper is to examine the principles of the use of atlases of intracerebral structures with regard to the planning system. Namely, when calculating the risk of the surgery. The work deals with issues that relate to the possibility of using the digital brain atlas in neurosurgical systems of preoperative planning. In this paper, used digitized Talairach atlas stored in the volume of 141x172x110. Talairach atlas is one of the most used atlases in stereotactic procedures. To account for the fuzziness of intracerebral structures proposed the use of a modified method for the calculation of invasiveness of surgical access. It uses a modified version of a digital atlas, which is obtained by fuzzification of the binary data in different modalities risk. Blur simulates the ambiguity of the position of the intracerebral brain structures. Also showed the calculation of the risk of surgical access based on fuzzified digital atlas. The next step is the calculation of the standard surgical approaches of risk maps based on the atlas in relation to access to typical intracerebral structures. This should allow the identification of the most appropriate surgical access and demonstrate their low invasiveness. Outlook of work are the inclusion of the method in neurosurgical system of preoperative planning of surgical intervention on the human brain. This should reduce the risk of surgical intervention, and therefore increase the length and quality of life of patients.

Keywords: neurosurgery, brain atlas, Talairach atlas, stereotaxy, computer aided planning

Введение

Стереотаксическая хирургия головного мозга является основным, используемым малоинвазивным методом в нейрохирургии, особенно при биопсии,

деструкции или стимуляции глубоких структур головного мозга [1].

В сочетании с различными интроскопическими методами исследования, стереотаксис позволяет эффективно определить траекторию хирургического

доступа и произвести малоинвазивное вмешательство [2].

собой 16-битное целое, указывающее на анатомическую структуру (табл. 1).

Актуальность

Атласы внутримозговых структур применяются повсеместно как в обучении, так и в практической хирургии [3]. Их использование должно повысить как качество обучения, так и проведения оперативного вмешательства. Кроме того, перспективным направлением является виртуальная хирургия, которая позволяет обеспечить определенными практическими навыками хирурга без реального оперативного вмешательства.

Анализ последних исследований и литературы

Исследователи всего мира активно занимаются разработкой и внедрением атласов внутримозговых структур [4-5]. Кроме того, разрабатываются методы сегментации данных интроскопических исследований с использованием деформируемых атласов [6]. Также ведутся работы по разработке систем виртуальной хирургии на головном мозге, с использованием цифровых атласов внутримозговых структур [7-8].

Цель работы

При разработке нейрохирургических комплексов, программное обеспечение, которое обеспечивает расчет оптимальной траектории хирургического доступа, является важной задачей. Выбор такой траектории, кроме опыта врача, должен основываться на анатомическом строении мозга человека.

В то же время, принадлежность конкретного элемента объема мозга определенной структуре является весьма “размытым” понятием, а, следовательно, и риск вмешательства в данный объем является не таким однозначным процессом. Поэтому целью данной работы является изучение процесса определения и оптимизации хирургического доступа с использованием цифрового атласа внутримозговых структур.

Цифровой атлас внутримозговых структур

Атласы человеческого тела имеют давнюю историю, беря своё начало из рисунков анатомов эпохи Возрождения, и заканчивая работами Пирогова Н. И. по топографической анатомии. В настоящее время, основными атласами, используемыми при стереотаксисе, являются: атлас Талайраха, а также MNI атлас [9].

В работе использовались данные оцифрованного атласа Талайраха [4-5]. На рис. 1 представлен пример среза. Используемые данные представляют собой объем размером 141x172x110 вокселей. Каждый элемент объема представляет



Рис. 1 – Срез из атласа Талайраха

Таблица 1 – Пример анатомических структур в атласе Талайраха

Индекс	Величина
0	Пустота
1	Left Cerebellum.Posterior Lobe.Inferior Semi-Lunar Lobule.Gray Matter
69	Right Cerebellum.Sub-lobar.Fourth Ventricle.Cerebro-Spinal Fluid
71	Left Brainstem.Pons
191	Left Cerebrum.Frontal Lobe.Inferior Frontal Gyrus.Gray Matter.Brodmann area
273	White Matter.Optic Tract
438	Right Brainstem.Midbrain.Thalamus.Gray Matter.Medial Geniculum Body

Визуализация интактной поверхности [10] данного атласа представлена на рис. 2.



Рис. 2 – Трехмерная визуализация интактной поверхности атласа

Риск хирургического доступа

Имеющийся атлас можно использовать в системе планирования, при расчете риска хирургического вмешательства сопоставив [11] каждой структуре определенное значение инвазивности с помощью функции преобразования (1).

$$R(x, y, z) = f(S(x, y, z)), \quad (1)$$

где x, y, z – координаты вокселя;
 R – индекс инвазивности (индекс риска);
 S – структура;
 f – функция преобразования.

Но, следует принять во внимание, что данный подход в некоторой степени эффективен для специализированного расчета данных пациента полученных при интроскопическом исследовании. В случае хирургического атласа присутствует ошибка, которая связана с неоднозначностью (нечеткостью) при сопоставлении каждому элементу объема анатомической структуры, а значит и индекса инвазивности. Таким образом, говорить о наличии значения риска в определенной точке не совсем возможно (рис. 3).

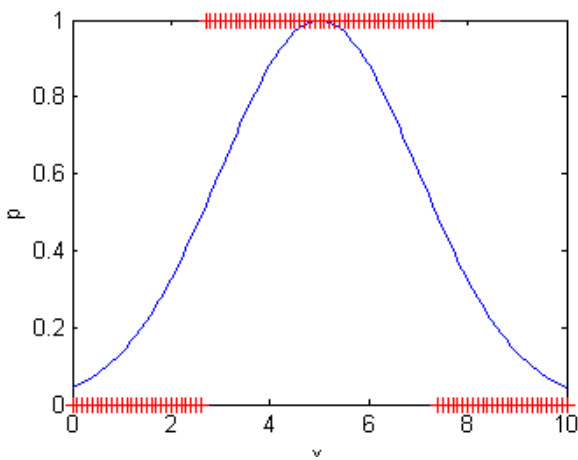


Рис. 3 – Графическое представление нечеткого значения

Поэтому, следуя данным рассуждениям, анатомический атлас следует преобразовывать в атлас, который все это учитывает (рис. 4).

Построение такого “размытого” атласа хирургических рисков состоит из нескольких этапов. На первом этапе весь атлас разделяется на N объемов, где N – количество коэффициентов инвазивности. Каждому объему (V_B) соответствует определенное значение риска, а наличие в элементе объема значения равное единице, свидетельствует о наличии риска. Разбиение происходит исходя из (1). На данном этапе данное представление является идентичным вышеизложенному, и не привносит

никаких различий при определении риска хирургического вмешательства.

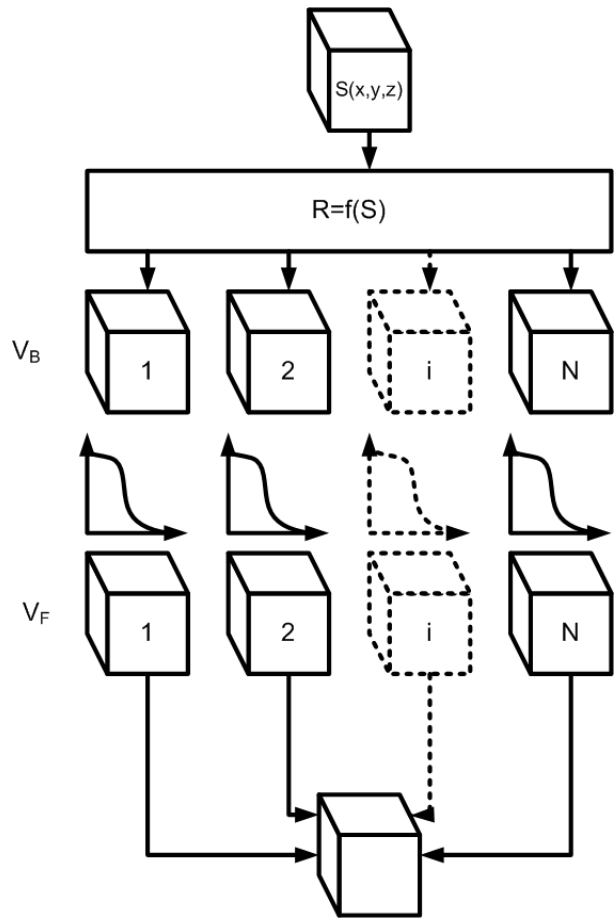


Рис. 4 – Схема построения атласа с учётом вариальности

На следующем этапе производится размытие бинарных объемов (V_B) в размытый объем (V_F). Размытие может осуществляться с использованием трехмерного фильтра Гаусса.

На рис. 5 представлен пример размытия бинарных данных синтетического объема.

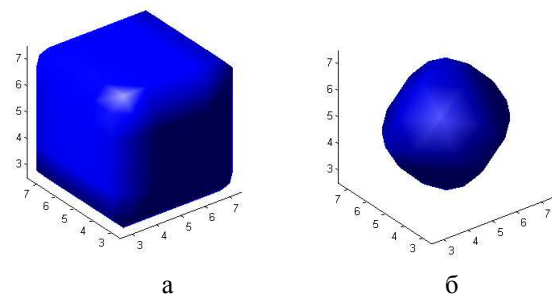


Рис. 5 – Пример трехмерного размытия бинарных данных

Следующий этап заключается в нормализации значений сквозь размытые объемы, а именно должна удовлетворяться зависимость (2).

$$\sum_{i=1}^N V_F^i(x, y, z) = 1, \tag{2}$$

где i – номер объема.

Обеспечение равенства данной зависимости осуществляется с помощью выражения (3).

$$\left\{ \begin{aligned} V_F^1(x, y, z) &= \frac{V_F^1(x, y, z)}{\sum_{i=1}^N V_F^i(x, y, z)}; \\ V_F^2(x, y, z) &= \frac{V_F^2(x, y, z)}{\sum_{i=1}^N V_F^i(x, y, z)}; \\ &\dots \\ V_F^N(x, y, z) &= \frac{V_F^N(x, y, z)}{\sum_{i=1}^N V_F^i(x, y, z)}, \end{aligned} \right. \tag{3}$$

Следует принять во внимание одно исключение (4).

$$V_F(x, y, z) = 0 \text{ if } \sum_{i=1}^N V_F^i(x, y, z) = 0. \tag{4}$$

В случае расчета риска хирургического вмешательства по однозначным данным следует воспользоваться выражением (5).

$$F(m) = \sum_{n=1}^L L^{R(x(n), y(n), z(n))}, \tag{5}$$

где L – количество разбиений хирургического доступа;
 m – траектория, для которой рассчитывается значение риска.

В случае размытого значения, расчет риска хирургического вмешательства рассчитывается исходя из выражения (6).

$$F(m) = \sum_{n=1}^L L^{\sum_{i=1}^N i \times V_F^i(x(n), y(n), z(n))}. \tag{6}$$

В случае использования однозначного объема, выражение (6) преобразовывается в (5). Что свидетельствует о более полной форме (6).

Выбор наименее травматичного хирургического доступа осуществляется как путем

поиска минимального значения из рисковой карты, так и путем наглядного выбора наиболее удобного хирургу доступа.

Обсуждение результатов

С целью проверки работы данного метода, с использованием цифрового атласа был рассчитан риск хирургического вмешательства для одного из элементов объема (рис. 6).

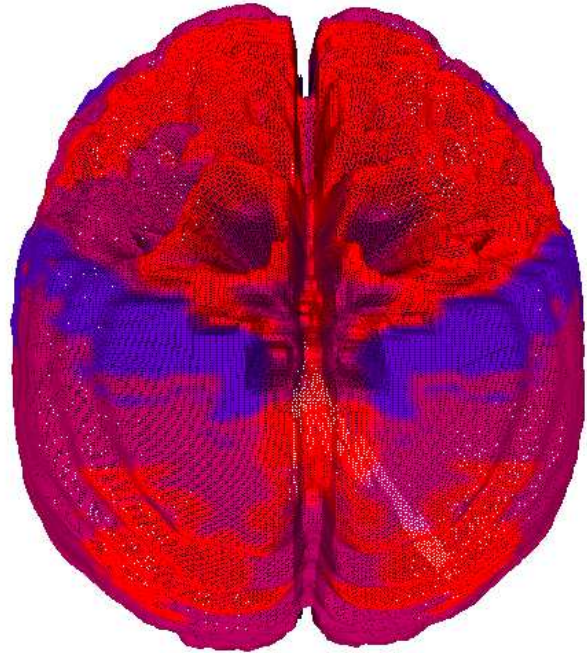


Рис. 6 – Моделирование расчета рисковой карты хирургических доступов по цифровому атласу

Выводы

В работе проводилась разработка метода определения и оптимизации хирургического доступа с использованием цифрового атласа внутримозговых структур. В качестве базового был использован нейрохирургический атлас Талайраха, ориентиры и система координат которого являются общепринятыми в нейрохирургической практике по всему миру.

Показан пример расчета риска хирургического вмешательства с использованием цифрового атласа головного мозга человека. Дальнейшим шагом в работе является расчет стандартных рисковых карт хирургических доступов на основе данного атласа применительно к доступам к типовым внутримозговым структурам. Это должно позволить выявить наиболее оптимальные

хирургические доступы и наглядно продемонстрировать их малую инвазивность.

Перспективой работы является включение данного метода в нейрохирургическую систему предоперационного планирования хирургических вмешательств на головном мозге человека. Это позволит сократить риск возникновения осложнений при проведении нейрохирургических вмешательств, и, соответственно, повысить продолжительность и качество жизни пациентов.

Список литературы

- 1 **Brontë-Stewart, H.** Clinical motor outcome of bilateral subthalamic nucleus deep-brain stimulation for Parkinson's diseases using image-guided frameless stereotaxy / **H. Brontë-Stewart, S. Louie, J. M. Henderson** // *J. Neurosurgery*. – 2010. – V. 67, № 4. – P. 1088-1093.
- 2 **Raza, S. M.** Minimally Invasive Trans-Portal Resection of Deep Intracranial Lesions / **S. M. Raza, P. F. Recinos, J. Avendano, H. Adams, G. I. Jallo, A. Ouinones-Hinojosa** // *Minim Invas Neurosurg J.* – 2011. – V 54. – P. 5-11.
- 3 **Mazziotta, J. C.** A Probabilistic Atlas of the Human Brain: Theory and Rationale for Its Development / **J. C. Mazziotta, A. W. Toga, A. Evans, P. Fox, J. Lancaster** // *Neuroimage*. – 1995. – V. 2, № 2. – P. 89-101.
- 4 **Lancaster, J. L.** Automated Talairach Atlas labels for functional brain mapping / **J. L. Lancaster, M. G. Woldorff, L. M. Parsons, M. Liotti, C. S. Freitas et al.** // *Human Brain Mapping*. – 2000. – № 10. – P. 120-131.
- 5 **Lancaster, J. L.** Automated labeling of the human brain: A preliminary report on the development and evaluation of a forward-transform method / **J. L. Lancaster, L. H. Rainey, J. L. Summerlin, C. S. Freitas et al.** // *Human Brain Mapping*. – 1997. – № 5. – P. 238-242.
- 6 **Linguraru, M. G.** Segmentation Propagation from Deformable Atlases for Brain Mapping and Analysis / **M. G. Linguraru, T. Vercauteren, M. Reyes-Aguirre, M. A. G. Ballester, N. Ayache** // *Brain Research Journal*. – 2007. – V. 1, – № 4. – P. 1-18.
- 7 **Poston, T.** The Brain Bench: virtual stereotaxis for rapid neurosurgery planning and training / **T. Poston, W. L. Nowinski, L. Serra, C. B. Choon, N. Hern** // *Visualization in Biomedical Computing*. – 1996. – P. 491-500.
- 8 **Wittek, A.** Computing Reaction Forces on Surgical Tools Robotic Neurosurgery and Surgical Simulation / **A. Wittek, J. Laporte, K. Miller, R. Kikins, S. K. Warfield** // *Proc of Australasian Conference on Robotics and Automation ACRA*. – 2004. P. 1-8.
- 9 **Lancaster, J. L.** Bias Between MNI and Talairach Coordinates Analyzed Using the ICBM-152 Brain Template / **J. L. Lancaster D. Tordesillas-Gutierrez M. Marinez F. Salinas et al.** // *Human Brain Mapping*. – 2007. – № 28. – P. 1194-1207.
- 10 **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.
- 11 **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.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Brontë-Stewart, H., Louie S., Batya, S., Henderson, J. M.** Clinical motor outcome of bilateral subthalamic nucleus deep-brain stimulation for Parkinson's diseases using image-guided frameless stereotaxy. *J. Neurosurgery*. – 2010. – № 4(67). – P. 1088-1093.
- 2 **Raza, S. M., Recinos, P. F., Avendano, J., Adams, H., Jallo, G. I., Ouinones-Hinojosa, A.** Minimally Invasive Trans-Portal Resection of Deep Intracranial Lesions. *Minim Invas Neurosurg J.* – 2011. – № 54. – P. 5-11.
- 3 **Mazziotta, J. C., Toga, A. W., Evans, A., Fox, P., Lancaster, J.** A Probabilistic Atlas of the Human Brain: Theory and Rationale for Its Development. *Neuroimage*. – 1995. – № 2(2). – P. 89-101.
- 4 **Lancaster, J. L., Woldorff, M. G., Parsons, L. M., Liotti, M., Freitas, C. S., Rainey, L., Kochunov, P. V., Nickerson, D., Mikiten, S. A., Fox, P. T.** Automated Talairach Atlas labels for functional brain mapping. *Human Brain Mapping*. – 2000. – № 10. – P. 120-131.
- 5 **Lancaster, J. L., Rainey, L. H., Summerlin, J. L., Freitas, C. S., Fox, P. T., Evans, A. C., Toga, A. W., Mazziotta, J. C.** Automated labeling of the human brain: A preliminary report on the development and evaluation of a forward-transform method. *Human Brain Mapping*, 1997, № 5, P. 238-242.
- 6 **Linguraru, M. G., Vercauteren, T., Reyes-Aguirre, M., Ballester, M. A. G., Ayache, N.** Segmentation Propagation from Deformable Atlases for Brain Mapping and Analysis. *Brain Research Journal*, 2007, № 4(1), P. 1-18.
- 7 **Poston, T., Nowinski, W. L., Serra, L., Choon, C. B., Hern, N.** The Brain Bench: virtual stereotaxis for rapid neurosurgery planning and training. *Visualization in Biomedical Computing*. – 1996. – P. 491-500.
- 8 **Wittek, A., Laporte, J., Miller, K., Kikins, R., Warfield, S. K.** Computing Reaction Forces on Surgical Tools Robotic Neurosurgery and Surgical Simulation. *Proc of Australasian Conference on Robotics and Automation ACRA*. – 2004. – P. 1-8.
- 9 **Lancaster, J. L., Tordesillas-Gutierrez, D., Marinez, M., Salinas, F., Evans, A., Zilles, K., Mazziotta, J. C., Fox, P. T.** Bias Between MNI and Talairach Coordinates Analyzed Using the ICBM-152 Brain Template. *Human Brain Mapping*. – 2007. – № 28. – P. 1194-1205.
- 10 **Tymkovych, 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). – P. 37-41.
- 11 **Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., Farouk, H. I.** Determining the degree of invasiveness of surgical access for planning surgery. *Bionics of Intelligense*. – 2013. – № 2(81). – P. 101-104.

Поступила (received) 20.06.2015

УДК 616.006.34:616-089+615.849.12+681.3

ОЦЕНКА КТ-ПАРАМЕТРОВ КОСТНОЙ ТКАНИ В ПЛАНИРОВАНИИ ВНУТРИТКАНЕВОЙ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ

Л. А. АВРЬЯНОВА^{1*}, А. К. АВАКЯН¹, А. В. ГРУШКА², А. В. ЗИНВАЛЮК³, В. В. КУЛИЧЕНКО⁴

¹ Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

² ГУ «Институт медицинской радиологии им. С.П. Григорьева НАМН Украины», Харьков, УКРАИНА

³ ООО «Украинский центр томотерапии», Кировоград, УКРАИНА

⁴ Кафедра промышленной и биомедицинской электроники, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

* email: averyanova-lilya@rambler.ru

АННОТАЦИЯ У роботі аналізується проблема обґрунтування вибору кількісних характеристик для індивідуалізації дози опромінення пацієнта при плануванні внутрішньотканної радіонуклідної терапії. Пропонується застосування метода обробки КТ-скана тіла хребця з метою кількісної оцінки стану трабекулярних структур та кісткового мозку перед променевим лікуванням кісткових метастазів. Цей метод дозволить уточнити план лікування, що сприятиме підвищенню ефективності лікування та мінімізації можливих ускладнень.

Ключові слова: внутрішньотканна радіонуклідна терапія (РНТ), кісткові метастази, трабекулярна структура тіла хребця, комп'ютерна томографія (КТ), мінеральна щільність кістки, обробка зображення

АННОТАЦИЯ В работе анализируется проблема обоснования выбора количественных характеристик для индивидуализации дозы облучения пациента при планировании внутритканевой радионуклидной терапии. Предлагается использование метода обработки КТ-скана тела позвонка с целью количественной оценки состояния трабекулярных структур и костного мозга перед лучевым лечением костных метастазов. Этот метод позволит уточнить план лечения, что будет способствовать повышению эффективности лечения и минимизации возможных осложнений.

Ключевые слова: внутритканевая радионуклидная терапия (РНТ), костные метастазы, трабекулярная структура тела позвонка, компьютерная томография (КТ), минеральная плотность кости, обработка изображения.

ESTIMATION OF BONE TISSUE CT-PARAMETERS FOR INTERSTITIAL RADIONUCLIDE THERAPY PLANNING

L. AVERYANOVA^{1*}, A. AVAKYAN¹, A. GRUSHKA², A. ZINVALUK³, V. KULICHENKO⁴

¹ Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

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

³ Ukrainian Center of TomoTherapy, Ltd., Kirovograd, UKRAINE

⁴ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The goal of the study is quantitative selection of characteristics for the individualization of the radiation dose of the patient while planning interstitial radionuclide therapy. It is proposing to use the method of processing the CT scan of the vertebral body with quantifying the state of the trabecular structures and bone marrow prior to radiotherapy of bone metastases. Bone status of CT scans and X-ray images carried out by analyzing the profile of the image brightness (densitograms), which contains information on morphological features of bone structures.

In a preliminary analysis of the possibility of quantitative assessment of bone on CT slices of the vertebral body L5. In the Matlab IPT environment was processed a rectangular area in the middle of the cut vertebra, with the definition of threshold values for binarization Hounsfield numbers. Graphical transformations of the CT drug results are shown in the corresponding histograms. Histogram of binary image allows us to estimate the ratio of the area of the image trabecular vertebral body and soft tissue filling. According to the BMD(x) function was calculated the range of morphometric parameters of the vertebral body. The morphometric parameters indicates a thinning of the cortical wall at OP and densitometrical parameters indicates a decreasing in the mineral components. This method will allow clarify the treatment plan for treatment effectiveness increasing and minimizing complications.

Keywords: interstitial radionuclide therapy (RNT), bone metastasis, vertebra body trabecular structure, computed tomography (CT), bone mineral density (BMD), image processing.

Введение

Актуальной и сложной задачей в онкологии остается паллиативная терапия костной метастатической болезни. Основным методом лечения рака с костными метастазами является

внутритканевая лучевая (радионуклидная) терапия (РНТ). Ее суть состоит в том, что радиоизотопы, которые при попадании в организм накапливаются именно в костной ткани, облучают раковые метастазы локально, оказывая минимальное негативное воздействие на другие органы. В настоящее время в

мире успешно используется остеотропный радиофармпрепарат ^{153}Sm -оксабифор, однако недостаточно изучены вопросы научно обоснованного выбора его индивидуальной дозировки, не вызывающей ухудшения состояния костных структур и костного мозга [1].

Важная информация о состоянии этих структур содержится в диагностических изображениях – прежде всего это результаты рентгеновской компьютерной томографии (КТ) и радионуклидной визуализации. Однако, отсутствие интегративного подхода к оценке морфофункциональных параметров костных структур с учетом количественного анализа их изображений негативно влияет на качество планирования РНТ.

Актуальность

Анализ современной зарубежной литературы показал, что в настоящее время не существует единого подхода, направленного на индивидуальное обоснование терапевтической дозы облучения ^{153}Sm для РНТ больных с метастатическим поражением костной системы. Существующие рекомендации Европейской Ассоциации Ядерной Медицины относительно применения ^{153}Sm [2] не решают проблем индивидуализации РНТ. Особое внимание исследователей привлечено к оценке биопроб пациентов [3], в меньшей степени привлекаются данные томографической визуализации костных структур различных модальностей [4]. В то же время результаты КТ и радионуклидной визуализации должны использоваться для оценки возможных рисков повреждения структур позвонков вследствие их лучевого повреждения, которое, в частности может проявляться как нарушение ремоделирования костной ткани (пострадиационный осеопороз), что повышает риск патологических переломов позвоночника [5]. Таким образом, создание средств компьютерной обработки визуальной диагностической информации для целей планирования РНТ является актуальной научной задачей.

Анализ последних исследований и литературы

Исследование вопросов количественной оценки остеопоротических изменений тел позвонков по результатам КТ-визуализации проводится во многих направлениях. Предложены количественные показатели оценки динамики изменений костных структур при потере костной массы [5-12], однако эта проблема должна быть рассмотрена в неразрывной связи с причиной возникновения этого патологического процесса. С точки зрения создания комплекса средств оценки костного статуса при проведении РНТ костных метастазов данная задача не рассматривалась. В то же время, например, по результатам КТ можно оценить целостность микроструктур костной ткани и определить,

возможно ли лечение данного пациента методом РНТ, тем более, что все пациенты, направляемые на РНТ, имеют результаты КТ.

Цель работы

Поиск методов количественной оценки состояния костных структур по результатам их КТ-визуализации для оценки степени поражения костной ткани и уточнения необходимого объема РНТ.

Показатели для оценки КТ-плотности кости

Определение минеральной плотности кости (*BMD*) можно проводить несколькими методами (рентгеновская абсорбциометрия, ультразвуковая денситометрия и др.), однако денситометрия кости по КТ-снимкам имеет множество преимуществ, позволяя разделить кортикальную и трабекулярную структуры; определить истинное объемное значение плотности в $\text{мг}/\text{см}^3$ и морфометрические параметры кости.

В [6,7] приведено описание расчета *BMD* по шкале Хаунсфилда (рис. 1). Согласно классификации Д.Фельсенберга [7] МПК определяется следующими пороговыми значениями: норма ($> 120 \text{ мг}/\text{см}^3$); остеопения ($< 120 \text{ мг}/\text{см}^3$); остеопороз ($< 80 \text{ мг}/\text{см}^3$); очень высокий риск разрушения ($< 50 \text{ мг}/\text{см}^3$). Преобразование чисел Хаунсфилда (НУ) в значение МПК требует базового материала с известными свойствами поглощения. Как показал анализ имеющейся информации, основной проблемой при осуществлении программной обработки КТ-снимка и его количественного анализа является обоснование выбора окна чисел Хаунсфилда для разделения (сегментации) изображений костных структур и костного мозга (табл.1).

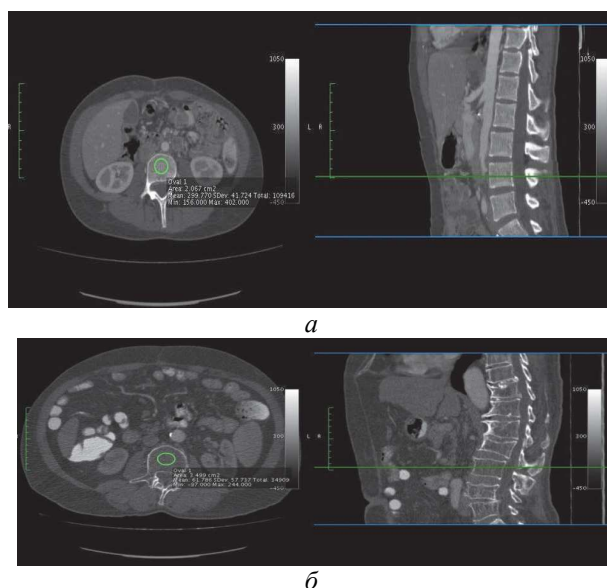


Рис. 1 – Определение минеральной плотности трабекулярной кости по КТ:
а - 299 НУ (норма); б - 63 НУ (патология) [7]

Исследование костного статуса по КТ-сканам и рентгеновским изображениям часто проводят с помощью анализа профиля яркости изображения (денситограммы), который содержит информацию о морфологических особенностях костных структур. На примере анализа КТ-скана стандартизированного Европейского фантома позвоночника [8] показана методика построения КТ-денситограммы и расчета BMD по фантому тела позвонка L1 (рис. 2). Функция $BMD(x)$ определяется как результат свертки функции распределения истинной плотности кости $BMD^t(x)$ с одномерной функцией рассеяния точки $PSF(x)$ [9]

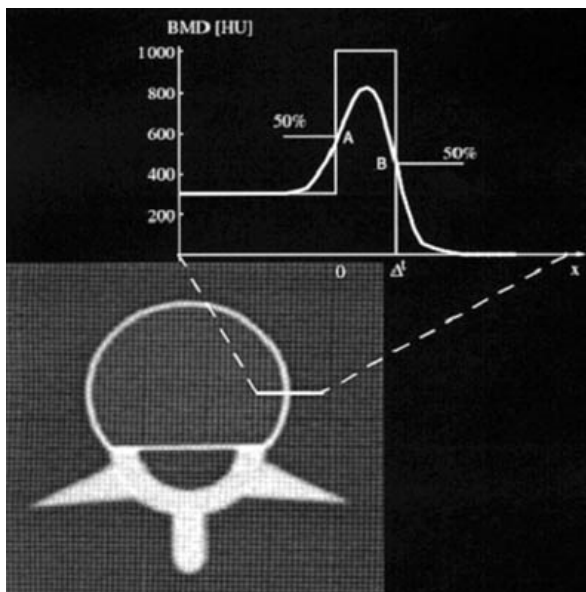


Рис. 2 – Анализ КТ-денситограммы фантома тела позвонка L1 для определения BMD [9]

$$BMD(x) = BMD^t(x) * PSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} dx' BMD^t(x-x') PSF(x') \tag{1}$$

Точки А и В, определенные в результате сегментации, используются для определения толщины кортикальной кости. Кортикальная плотность определяется путем интегрирования $BMD(x)$ в пределах А и В. В дальнейшем предполагается, что $BMD^t(x)$ может описываться ступенчатой функцией с истинной шириной Δ^t

$$BMD^t(x) = \begin{cases} BMD_1^t : x < 0 \\ BMD_2^t : 0 \leq x \leq \Delta^t \\ BMD_3^t : x > \Delta^t \end{cases} \tag{2}$$

Данный подход также можно применить для определения костного статуса у пациентов, для которых планируется РНТ.

Предлагаемый метод предполагает совместную

оценку ряда показателей: минеральной плотности кости BMD и морфометрических параметров костных структур [14]. Эти показатели измеряются в пределах оконтуренного участка тела позвонка. Количественные показатели состояния костной структуры и костного мозга предлагается определять по КТ-изображениям среза середины пятого поясничного позвонка L5. КТ-сканирование проводится на догоспитальном этапе. Поскольку у большинства пациентов наблюдалась системная остеопения, при выполнении работы были рассмотрены известные методы оценки состояния костных структур по КТ. Преимуществом использования данного метода диагностики является возможность независимой оценки состояния трабекулярной и кортикальной структуры кости [5].

Степень заполнения позвонка дает оценку пропорции заполнения объема трабекулами и костным мозгом. На оконтуренном участке тела позвонка трабекулярные структуры будут более яркими по сравнению с костным мозгом (рис. 1).

Таблица 1 – Классификация плотности костной ткани по значениям HU (Lekholm and Zerh (1985) [10]

Тип кости	Значение HU	Пояснения
D1	>1250 HU	Гомогенная компактная кость
D2	850-1250 HU	Толстый слой кортикальной кости, окружающий плотную трабекулярную кость
D3	350-850 HU	Тонкий слой кортикальной кости, окружающий плотную трабекулярную кость достаточной прочности
D4	150-300 HU	Тонкий слой кортикальной кости, окружающий трабекулярную кость пониженной плотности
D5	<150 HU	Очень «мягкая» кость с незавершенной минерализацией

Для отдельного анализа костных структур и мягкотканного заполнения тела позвонка необходимо произвести сегментацию изображения тела позвонка, что позволит рассчитать количество «светлых» и «темных» элементов. Для этого необходимо бинаризовать изображение. Изображение представляет собой совокупность оттенков серого, поэтому исходным шагом является поиск окна визуализации по порогу чисел Хаунсфилда (табл.1). Для оценки соотношения площади «черных» и «белых» участков на снимке строится гистограмма их распределения.

Коэффициент заполнения позвонка костными структурами K предлагается определять как отношение площади трабекулярного рисунка к площади заполняющих его структур

$$K = N_W / N_B,$$

где N_W и N_B – соответственно количество белых и черных пикселей на бинаризованном фрагменте КТ-снимка тела позвонка.

Это соотношение будет отличаться в норме и при структурных нарушениях трабекулярной кости различной степени тяжести. Дополнительно предполагается оценить толщину кортикальной стенки и пористость трабекулярной ткани позвонка с применением подхода, описанного в [9,10].

Обсуждение результатов

С целью проверки работы данного метода была произведена компьютерная обработка КТ-изображения тела поясничного позвонка L5 у пациента с потерей костной массы. Выделялся прямоугольный участок в средней части среза позвонка. Далее производилась его обработка в среде Matlab IPT. Порог бинаризации определялся по значениям чисел Хаунсфилда с учетом данных табл.2. Результаты преобразований графического КТ-препарата и соответствующие гистограммы приведены на рис. 3.

Гистограмма бинаризованного изображения дает возможность оценить соотношение площади изображения трабекул тела позвонка и его мягкотканного заполнения. Для рассмотренного примера (рис. 3) коэффициент заполнения тела позвонка трабекулами составил $K = 5854 / 4754 = 1,2314$.

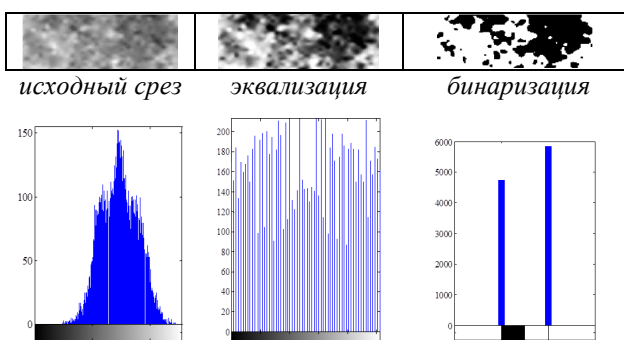


Рис.3 – Фрагмент КТ-среза трабекулярных структур тела позвонка L5 и гистограммы распределения оттенков серого в процессе его преобразования

Далее, в соответствии с (1, 2), были проведены расчеты ряда морфометрических параметров тела позвонка. Денситограммы тела позвонка в норме и при остеопорозе (ОП) анализировались методом компьютерной морфоденситометрии [14]. КТ-срез имел толщину 1 мм, количество градаций серого – 256, пространственное разрешение изображения

300 dpi, формат BMP. Определялись (рис. 4): диаметр тела позвонка D по наружной стенке (расстояние между внешними вертикальными линиями), диаметр по внутренней стенке d (расстояние между внутренними вертикальными линиями), толщина кортикальной стенки $L=(D-d)/2$, средний уровень серого в кортикальном пике $P_{КП}$ (в максимумах), минимальный уровень серого в трабекулярной области (горизонтальная линия) $P_{ТП}$, количество трабекулярных (малых) пиков $N_{ТП}$.

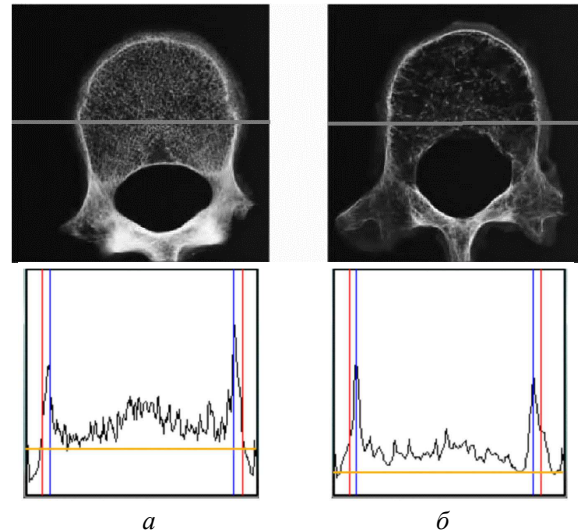


Рис. 4 – КТ-срезы и КТ-денситограммы тел позвонков L5 в норме (слева) и при остеопорозе

Данные расчетов предлагаемых параметров приведены в табл. 2. Морфометрические параметры указывают на истончение кортикальной стенки при ОП (в основном за счет эндостальной резорбции), а денситометрические параметры указывают на уменьшение минеральной компоненты (снижение всех амплитудных значений кривой б). Уменьшение количества пиков от трабекулярных перегородок на кривой б указывает на увеличение пористости трабекулярной костной ткани.

Таблица 2 – Морфоденситометрические параметры тела позвонка L5 в норме и при ОП

случай	D, мм	d, мм	L, мм	$P_{КП}$	$P_{ТП}$	$N_{ТП}$
норма	28,1	25,5	1,3	174	34	22
ОП	26,4	24,4	1	126	19	14

Выводы

В работе проведен предварительный анализ возможностей количественной оценки состояния костной ткани по КТ-средам тела позвонка L5. В дальнейшем следует провести обработку большого количества данных КТ для определения порога «норма/патология» для предлагаемых показателей, оценить их информативность в комплексном

планировании РНТ. Требуется также более строгое обоснование при определении диапазона чисел Хаунсфилда для выбора КТ-окна анализируемого КТ-изображения. Предложенные показатели позволят более точно оценить параметры структур тела позвонка, которые позволят более рационально спланировать РНТ путем расчета индивидуальной биоадекватной дозы радиоизотопа для каждого пациента.

Список литературы

1. **Bauman, G., Charette, M., Reid, R., Sathya, J.** Radiopharmaceuticals for the palliation of painful bone metastasis-a systemic review. *Radiother Oncol* 2005, Jun; № 75(3), 258-70.
2. **Hindorf, C.** et al. EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2010 Jun; № 37(6), 1238-50. doi: 10.1007/s00259-010-1422-4.
3. **Carlo, L. Maini** et al. ¹⁵³Sm-EDTMP for bone pain palliation in skeletal metastases. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* (2004), № 31 (Suppl. 1): S. 171–S178. doi: 10.1007/s00259-004-1540-y.
4. **Krishnakumar Ramachandran** et al. Comparison of Tc-99m MDP and Sm-153 EDTMP bone scan. *Indian J Nucl Med*. 2011 Jul-Sep; № 26(3), C. 163-164. doi: 10.4103/0972-3919.104005.
5. **Genant, H. K., Engelke, K., Prevrhal, S.** Advanced CT bone imaging in osteoporosis. *Rheumatology (Oxford)*. 2008 Jul; № 47 Suppl 4:iv9-16. DOI: 10.1093/rheumatology/ken180.
6. **Celenk, C., Celenk, P.** Bone Density Measurement Using Computed Tomography. *Computed Tomography – Clin. App.* 2012; C. 123-136. doi: 10.13140/2.1.1956.1924.
7. **Bauer, J. S., Virmani, S. and Mueller, D. K.** Quantitative CT to assess bone mineral density as a diagnostic tool for osteoporosis and related fractures. *MEDICAMUNDI* vol. 54 no. 2, 2010, C. 31-37.
8. **Kalender, W. A., Felsenberg, D., Genant, H.** et al. The European Spine Phantom - a tool for standardization and quality control in spinal bone measurements by DXA and QCT. *European J. Radiology*, № 20 (1995), C. 83-92.
9. **Sven Prevrhal, Klaus Engelke and Willi A Kalender.** Accuracy limits for the determination of cortical width and density: the influence of object size and CT imaging parameters. *Phys. Med. Biol.* № 44, (1999), C. 751–764.
10. **Reddy, T. Kalpalatha** Assessment of Trabecular Bone Texture from CT Images by Multiresolution Analysis and Classification Using SVM. / **T. Kalpalatha Reddy, N. Kumaravel, A. K. Shah** // *International Journal of Oral Implantology and Clinical Research*, May-August 2010, № 1(2), C. 55-60.
11. **Perilli, E.** Micro-CT examination of human bone: from biopsies towards the entire organ. / **E. Perilli, Ian H. Parkinson, Karen J. Reynolds** // *Ann Ist Super Sanità* 2012. Vol. 48, № 1, C. 75-82. doi: 10.4415/Ann_12_01_13.
12. **Buie, H. R.** et al. Automatic segmentation of cortical and trabecular compartments based on a dual threshold technique for in vivo micro-CT bone analysis. *Bone*, 2007 Oct; № 41(4), 505-15. Epub 2007 Jul 18.
13. **Boden, S. D.** et al. Precise measurement of vertebral bone density using computed tomography without the use of an external reference phantom. *J Digit Imaging*, 1989; № 2(1), S. 31-38.
14. **Averyanova, L. O.** The Method of Computer Roentgenomorphometry for Metacarpal Bones of Humans in the Diagnostics of Osteoporosis. Extended abstract of PhD dissertation: 05.11.17 / **L. O. Averyanova; Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv**, 2002. – 20 s.

Bibliography (transliterated)

1. **Bauman, G., Charette, M., Reid, R., Sathya, J.** Radiopharmaceuticals for the palliation of painful bone metastasis-a systemic review. *Radiother Oncol* 2005 Jun; № 75(3), S. 258-70.
2. **Hindorf, C.** et al. EANM Dosimetry Committee guidelines for bone marrow and whole-body dosimetry. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2010 Jun; № 37(6), 1238-50. doi: 10.1007/s00259-010-1422-4.
3. **Maini, C., L.** et al. ¹⁵³Sm-EDTMP for bone pain palliation in skeletal metastases. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2004, № 31 (Suppl. 1), S. 171–S178. doi: 10.1007/s00259-004-1540-y.
4. **Krishnakumar Ramachandran** et al. Comparison of Tc-99m MDP and Sm-153 EDTMP bone scan. *Indian J Nucl Med*. 2011 Jul-Sep; № 26(3): S. 163–164. doi: 10.4103/0972-3919.104005.
5. **Genant, H. K., Engelke, K., Prevrhal, S.** Advanced CT bone imaging in osteoporosis. *Rheumatology (Oxford)*, 2008 Jul;47 Suppl 4:iv9-16. DOI: 10.1093/rheumatology/ken180.
6. **Celenk, C., Celenk, P.** Bone Density Measurement Using Computed Tomography. *Computed Tomography – Clin. App.* 2012, S. 123-136. doi: 10.13140/2.1.1956.1924.
7. **Bauer, J. S., Virmani, S. and Mueller, D. K.** Quantitative CT to assess bone mineral density as a diagnostic tool for osteoporosis and related fractures. *MEDICAMUNDI* vol. 54 no. 2, 2010, S. 31-37.
8. **Kalender, W. A., Felsenberg, D., Genant, H.** et al. The European Spine Phantom - a tool for standardization and quality control in spinal bone measurements by DXA and QCT. *European J. Radiology*, № 20 (1995), S. 83-92.
9. **Sven Prevrhal, Klaus Engelke and Willi A Kalender.** Accuracy limits for the determination of cortical width and density: the influence of object size and CT imaging parameters. *Phys. Med. Biol.*, 1999, № 44, S. 751–764.
10. **Reddy, T. Kalpalatha, Kumaravel, N., Shah, A. K.** Assessment of Trabecular Bone Texture from CT Images by Multiresolution Analysis and Classification Using SVM. *International Journal of Oral Implantology and Clinical Research*, May-August 2010, №1(2), S. 55-60.
11. **Perilli, E., Parkinson, I. H., Reynolds, K. J.** Micro-CT examination of human bone: from biopsies towards the entire organ. *Ann Ist Super Sanità*, 2012, Vol. 48, № 1, S. 75-82. doi: 10.4415/Ann_12_01_13.
12. **Buie, H. R.** et al. Automatic segmentation of cortical and trabecular compartments based on a dual threshold technique for in vivo micro-CT bone analysis. *Bone*, 2007 Oct, № 41(4), 505-15. Epub 2007 Jul 18.
13. **Boden, S. D.** et al. Precise measurement of vertebral bone density using computed tomography without the use of an external reference phantom. *J Digit Imaging*, 1989; № 2(1), S. 31-38.
14. **Averyanova, L. O.** The Method of Computer Roentgenomorphometry for Metacarpal Bones of Humans in the Diagnostics of Osteoporosis. Extended abstract of PhD dissertation: 05.11.17 / **L. O. Averyanova; Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv**, 2002. – 20 s.

Поступила (received) 03.06.2015

УДК 615.47

ВИЗУАЛІЗАЦІЯ ОБОНЯТЕЛЬНОЙ ЩЕЛИ

Я. В. НОСОВА^{1*}, Н. О. ШУШЛЯПИНА², Т. В. НОСОВА¹

¹ Кафедра біомедицинської інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, УКРАЇНА

² Кафедра оториноларингології, Харківський національний медичинський університет, Харків, УКРАЇНА
*email: nyav007@gmail.com

АНОТАЦІЯ. Стаття присвячена проблемі візуалізації нюхової щілини. Вивчення процесу сприйняття та ідентифікації пахучих речовин необхідно для багатьох галузей життєдіяльності людини: від парфумерії та рекламного бізнесу до оборонної промисловості. Нюхова щілину є однією з основних складових частин нюхового аналізатора, тому візуалізація її внутрішніх структур являє собою важливу задачу для дослідження процесу сприйняття запахів. Розглянуто основні методи візуалізації верхніх дихальних шляхів.

Ключові слова: запах, ніс, щілину нюхова, пухлина, клітини базальні

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена проблеме визуализации обонятельной щели. Изучение процесса восприятия и идентификации пахучих веществ необходимо для многих отраслей жизнедеятельности человека: от парфюмерии и рекламного бизнеса до оборонной промышленности. Обонятельная щель является одной из основных составляющих частей обонятельного анализатора, поэтому визуализация ее внутренних структур представляет собой важную задачу для исследования процесса восприятия запахов. Рассмотрены основные методы визуализации верхних дыхательных путей.

Ключевые слова: запах, нос, щель обонятельная, опухоль, клетки базальные

VISUALIZATION OF THE OLFACTORY SLIT

Y. NOSOVA^{1*}, N. SHUSHLYAPINA², T. NOSOVA¹

¹ Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

² Department of Otorhinolaryngology, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, UKRAINE
*email: nyav007@gmail.com

ABSTRACT Purpose of work is consider possibilities of visualization of the olfactory slit for diagnostics of pathological conditions of the upper respiratory tract. The objectives of the work are the analysis of hardware and imaging techniques structures olfactory analyzer. Traditionally introspective diagnosis of diseases of the nasal cavity was performed by X-ray. At the present stage, to determine the configuration of the upper respiratory tract is expedient to use X-ray data spiral computed tomography. Visualization of the olfactory slit by digital volume tomography is recommended as the most informative methods in the complex preoperative examination of patients with diseases of the nose and paranasal sinuses, which are planned surgical intervention in the olfactory slit. Imaging Systems of computer tomographs often have modules dimensional (2D), as well as space (3D) processing and display of data. In the 2D module implements the functionality of building multiplanar reconstruction and segmentation of tomographic images on individual anatomical structures. When forming tomographic images reconstructed by means of spiral CT region seems set of elementary volumes - voxels (voxel - volume element), each of which is characterized by the density in Hounsfield units NU. Thus, the presented methods and imaging hardware olfactory slit through which is carried a correct diagnosis of pathological conditions of the upper respiratory tract, in particular the olfactory apparatus. considered methods make it possible to develop algorithms to generate optimal endosurgical access based on process modeling of of surgical interventions and post-operative monitoring of the patients.

Keywords: smell, nose, olfactory slit, tumor cells basal

Введення

Постановка проблеми. Проблема дослідження обонятельного аналізатора людини набирає все більшу популярність в останнє десятиліття. Не дивлячись на те, що практикуючі оториноларингологи дуже рідко вдаються до обстеження обонятельної функції пацієнтів в час прийому, даний питання ніколи не перестає цікавити вчених. Так як процес сприйняття і аналізу запахів до кінця не вивчений, ця проблема займає вчених різних спеціалізацій – від біологів і

хіміків до спеціалістів по створенню штучного інтелекту (для моделювання розпізнавання аромату розробляють нейронні мережі).

Аналіз останніх досліджень. На основі знань про будову і властивості обонятельного аналізатора виникла така галузь ринкової економіки, як ароматмаркетинг – "наука" про привертання клієнтів (покупателів) з допомогою розпилювання в торгових приміщеннях приємних запахів. Наприклад, запах шкіри навіває покупця думки про дороге якісне товари, аромат кави

побуждает к покупкам для домашнего ужина, в офисах туристических компаний начала применяться ароматизация воздуха экзотическими ароматами начиная от ароматов кокосового масла и заканчивая запахами апельсиновых рощ, для стимуляции у клиентов праздничного отпускного настроения и т.д. [1].

Данный вопрос также является актуальным в свете проведения АТО на востоке Украины, так как исследования в данной области может стать основой разработки нового оружия массового поражения. Например, американские военные "парфюмеры" разработали на редкость, дурно пахнущую бомбу, способную не только вызвать отвращение, но и разогнать солдат противника или агрессивно настроенную толпу [1]. Эту бомбу невозможно было бы создать без фундаментальных знаний касающихся функции обоняния.

Анатомические особенности человека не позволяют рассматривать обонятельный анализатор обособленно, так как визуализация внутренних структур может говорить не только, о нарушении правильного восприятия пахучих веществ, но и об других опасных заболеваниях.

Обонятельная дисфункция различной степени наблюдается при остром, аллергическом, вазомоторном ринитах, синуситах, аденоидитах, полипах носа, опухолях носа и околоносовых пазух, инфекционных гранулёмах. Практически при всех заболеваниях полости носа, протекающих с обструкцией её просвета, препятствующей поступлению воздушной струи и запахов к обонятельному эпителию, страдает обонятельная функция.

Цель работы

Целью работы является рассмотрение возможностей визуализации обонятельной щели для диагностики патологических состояний верхних дыхательных путей.

Задачами работы является анализ аппаратных средств и методов визуализации структур обонятельного анализатора.

В зависимости от степени затруднения доступа в обонятельную щель вдыхаемого воздуха, содержащего пахнущие вещества, развивается либо гипосмия (когда доступ затруднен) или anosmia (когда доступ полностью прекращен) [2].

Изложение основного материала

Обонятельная щель представляет собой пространство между медиальной поверхностью средней носовой раковины и противоположным участком перегородки носа.

Обонятельная щель выстлана особым эпителием, занимающим общую площадь в обоих носовых ходах около 5 см² [3].

Обонятельный эпителий включает три типа клеток:

Обонятельные нейроны – производят первый этап обработки обонятельной информации.

Клетки «поддержки» – питают обонятельные нейроны и являются их физической опорой. Базальные клетки – обеспечивают дифференциацию и обновление поврежденных нейронов.

Базальная клетка при делении может образовать обонятельный нейрон или клетку «поддержки». В результате регулярного деления базальных клеток обонятельный эпителий обновляется каждые 2-4 недели [4].

Однако, из базальных резервных клеток стволового обонятельного эпителия могут развиваться опухоли – новообразование головного мозга – обонятельная нейробластома (эстезионейробластома – ЭНБ).

Материалы и методы исследования. Методами визуализации ЭНБ являются спиральная компьютерная томография с трехмерной реконструкцией в комбинации с магнитно-резонансной томографией (МРТ). При этом опухоль не имеет специфических радиологических признаков, однако, расположение ее на ранних стадиях в области обонятельной щели помогает установить диагноз. Посредством компьютерной томографии (КТ) устанавливают стадию опухоли, состояние криворифмной и ситовидной пластинок, в то время как МРТ позволяет определить степень вовлечения в опухолевый процесс окружающих мягкотканых структур (а именно – твердой мозговой оболочки), а также дифференцировать опухоль от кистозного образования [5].

Первичным методом исследования обонятельной щели является передняя риноскопия. Этот метод позволяет оценить размеры и содержимое носовых ходов, особенно среднего и в области обонятельной щели. При наличии полипов, папиллом или других патологических тканей оценивают их внешний вид и при необходимости проводят забор ткани для биопсии.

С помощью микроэндофотографирования установлено, что в норме обонятельная щель всегда и на всем протяжении полностью открыта, а при воспалении слизистой оболочки носа на некоторых участках закрывается вследствие её утолщения и гиперсекреции: при полипах, синехиях, гипертрофии средней носовой раковины обонятельная щель может быть закрыта полностью [6].

Визуализация обонятельной щели методом цифровой объемной томографии рекомендуется в качестве наиболее информативного метода в комплексном предоперационном обследовании пациентов с заболеваниями носа и околоносовых пазух, которым планируется проведение

хирургического вмешательства в области обонятельной щели [7].

Традиционно интраскопическая диагностика заболеваний полости носа выполнялась с помощью рентгенографии. На современном этапе для определения конфигурации верхних дыхательных путей целесообразно использовать данные рентгеновской спиральной компьютерной томографии (СКТ), позволяющие выявлять костные и воздухоносные структуры с пространственным разрешением менее 1 мм [8].

Ввиду того, что верхние дыхательные пути представляют собой совокупность воздухоносных каналов, разделенных костными и хрящевыми структурами, для обеспечения более высокой пространственной разрешающей способности диагностических изображений целесообразно использовать средства рентгеновской томографии, обладающей, по сравнению с магнитно-резонансными установками, большей точностью при анатомическом картировании объектов, существенно различающихся по плотности [9-12].

Обсуждение результатов

Методы и алгоритмы, реализованные в программных модулях систем визуализации компьютерных томографов, представляют собой особый класс вычислительных задач. Процесс предварительной обработки томографических изображений состоит из процедур гистограммной коррекции и пространственной фильтрации, а так же подготовку к последующим стадиям анализа изображений.

Системы визуализации компьютерных томографов зачастую обладают модулями двумерной (2D), а также пространственной (3D) обработки и отображения данных.

В 2D модуле реализуются функции построения мультипланарных реконструкций и сегментации томографических изображений на отдельные анатомические структуры (рис.1). Создание мультипланарных реконструкций позволяет визуализировать структуру верхних дыхательных путей в плоскостях, ориентация которых не совпадает с плоскостью сканирования. Данный режим позволяет отображать конфигурацию разветвленной системы воздухоносных каналов и прилегающих анатомических объектов [8, 12].

Построение изображения при этом основано на указании плоскости R реконструкции по трем точкам $A(a_x, a_y, a_z)$, $B(b_x, b_y, b_z)$ и $C(c_x, c_y, c_z)$, две из которых, как правило, задаются в плоскости выбранного томографического среза, а третья определяет пространственную ориентацию плоскости реконструкции: Исходя из этого, плоскость реконструкции R определяется (параметрически, в координатной форме) из выражения:

$$R(t, l) = (C_x + a_x t + b_x l, C_y + a_y t + b_y l, C_z + a_z t + b_z l),$$

где t и l – параметры, причем $t, l \in [0, 1]$.



Рис. 1 – Пример мультипланарной реконструкции верхних дыхательных путей во фронтальной плоскости приведен на (обонятельная щель отмечена прямоугольником)

Режим пространственной (3D) визуализации данных является одним из наиболее информативных методов для применения при хирургическом планировании (рис. 2).

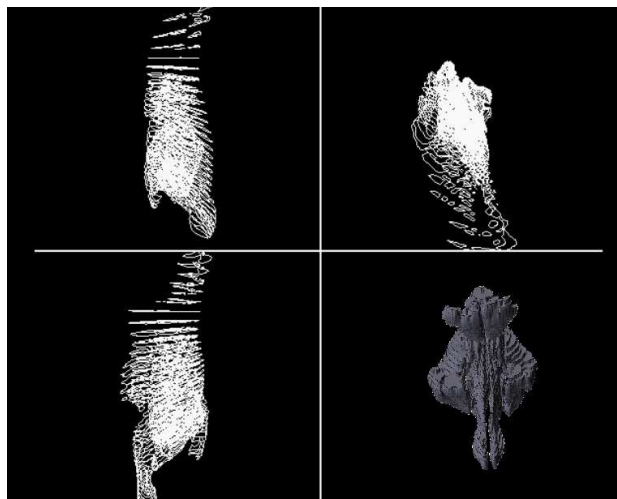


Рис. 2 – 3D многоакурсная визуализация объемных моделей дыхательных путей в 3х проекциях (сагитальная, фронтальная, аксиальная проекции)

При формировании томографических изображений средствами СКТ реконструированная область представляется совокупностью элементарных объемов – вокселей (voxel – volume element), каждый из которых характеризуется показателем плотности в единицах Хаунсфилда HU [8].

В результате формируется структурированное множество данных, представляющее собой

трехмерный массив значений интенсивности в точках с координатами $\{x_i, y_j, z_k\}$:

$$V(i, j, k) = V(x_i, y_j, z_k),$$

где

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 + i\Delta x, \\ y_j &= y_0 + j\Delta y, \\ z_k &= z_0 + k\Delta z. \end{aligned}$$

Каждое значение $V(i, j, k)$ является результатом усреднения скалярного поля в прямоугольном параллелепипеде со сторонами длиной $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ и центром в точке (x_i, y_j, z_k) .

С помощью варьирования параметрами прозрачности вокселей, принадлежащих различным объектам, можно выполнять визуализацию методом частичных разрезов, отмечая прозрачными воксели объектов, подлежащих удалению. Данный метод визуализации позволяет оценить пространственные взаимоотношения между воздухоносными полостями, носовыми ходами и окружающими структурами [8].

Пример визуализации объемной воксельной модели для исследования верхних дыхательных путей по данным СКТ приводится на рис. 3.

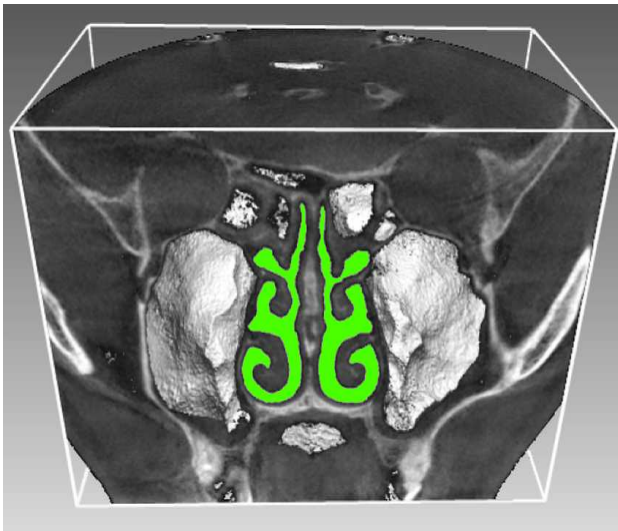


Рис. 3 – Объемная воксельная модель верхних дыхательных путей с сегментацией носовой полости

Пример многокурсовой визуализации пространственной модели воздушных путей полости носа (пустотами показаны костно-хрящевые структуры, носовые раковины) приводится на рис. 4.

Для многокурсовой визуализации объемных моделей применяются аффинные преобразования координат вокселей:

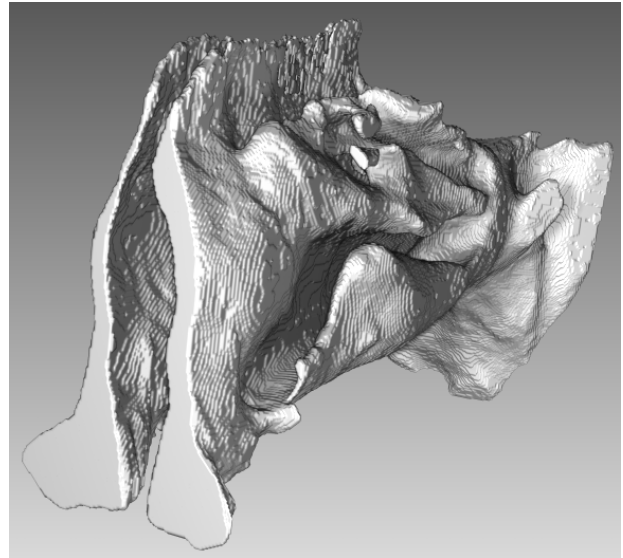


Рис. 4 – 3D визуализация верхних дыхательных путей

$$\begin{cases} X = Ax + By + Cz + D; \\ Y = Ex + Fy + Gz + H; \\ Z = Kx + Ly + Mz + N, \end{cases}$$

где A, B, \dots, N – константы, (x, y, z) и (X, Y, Z) – координаты вокселей до и после преобразования соответственно. При вычислениях используется матричная форма представления преобразований в однородных координатах.

Выводы

В работе показаны возможности интроскопических аппаратных средств и представлены методы визуализации обонятельной щели, с помощью которых проводят оценку состояния верхних дыхательных путей, в частности, области обонятельного анализатора. Также рассмотрены методы реконструкции, позволяющие выявлять необходимую диагностическую информацию об состоянии обонятельной щели.

Перспективным методом объективной диагностики обонятельной функции является высокоточная (с разрешением порядка 0,4 мм) томографическая визуализация обонятельной щели, с помощью которого возможно изучение доступа потока воздуха к обонятельным рецепторам. Рассмотренные методы в комплексе с функциональным контролем дыхания и обоняния дают возможность разработать алгоритмы для формирования оптимальных эндохирургических доступов на основе моделирования процессов проведения оперативных вмешательств и послеоперационного контроля состояния пациентов.

Список литературы

Bibliography (transliterated)

- 1 **Майоров, В.** Восприятие запахов / **В. Майоров** // *Наука и жизнь*. – 2007. – № 2. – С.64-69.
- 2 **Farouk, H.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways / **H. Farouk, A. Khaleel, O. Avrunin** // *Advances in Intelligent and Soft Computing: Image Processing and Communications Challenges 3*. – Springer, 2011. – Vol. 102. – S. 311-322.
- 3 **Farouk, H.** The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities / **H. Farouk, E. Abaida, A. Khaleel, O. Avrunin** // *International Journal of Life Science and Medical Research*. – 2012. – Vol. 2. № 3. – P. 52-55.
- 4 **Keller, A.** Hidden consequences of olfactory dysfunction: a patient report series / **Andreas Keller, Dolores Malaspina** // *BMC Ear, Nose and Throat Disorders*. – 2013. – № 13:8. – 20 p.
- 5 **Меркулов, О. А.** Эндоскопически ассистированный эндоназальный поход в хирургическом лечении эстезионеробластомы у детей / **О. А. Меркулов** // *Опухоли головы и шеи*. – Москва, 2012. – № 1. – С. 37-41.
- 6 **Алексеева, Н. С.** Оториноларингология / **Н. С. Алексеева, Л. Ф. Азнабаева, В. Ф. Антонив** и др. / Под ред. **В. Т. Пальчуна** – М: ГЭОТАР-Медиа, 2009 – 954 с.
- 7 **Савватеева, Д. М.** Клинические особенности периферических обонятельных расстройств: автореф. дис. канд. мед. наук : 14.01.03 / *Первый Моск. гос. мед. ун-т им. И. М. Сеченова*. – Москва: 2011. – 24 с.
- 8 **Аврунин, О. Г.** Визуализация верхних дыхательных путей по данным компьютерной томографии / **О. Г. Аврунин** // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2007. – № 4. – С. 119-122.
- 9 **Hirabayashi, H.** Comparison between stereotactic CT and MRI coordinates of pallidal and thalamic targets using the Laitinen noninvasive stereoadapter / **H. Hirabayashi, M. I. Hariz, M Fagerlund** // *Stereotact. funct. neurosurg.* – 1998. – Vol. 71, № 3. – P. 117-130.
- 10 **Farouk, H.** Comparison Discriminate Characteristics Between Modern TNDA-PRH Rhinomanometer And Previously Methodology / **H. Farouk, O. Avrunin** // *International Journal of General Engineering and Technology (IJGET)* ISSN 2278-9928. – 2013 – Vol. 2, Is. 2, – P. 39-50.
- 11 **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.
- 12 **Kwon, J.** Comparative computation of orbital volume from axial and coronal CT using three-dimensional image analysis / **J. Kwon, J. Barrera, S. Most**. // *Ophthal. Plast. Reconstr. Surg.* – 2010. – № 26 (1). – P. 26-29.
- 1 **Mayorov, V.** Vospriyatie zapakhov. *Nauka i zhizn'*. – 2007. – № 2. – S. 64-69.
- 2 **Farouk, H., Khaleel, A., Avrunin, O.** An attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways. *Advances in Intelligent and Soft Computing: Image Processing and Communications Challenges 3*. – Springer, 2011. – Vol. 102. – S. 311-322
- 3 **Farouk, H., Abaida, E., Khaleel, A., Avrunin, O.** The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research*. – 2012. – Vol. 2. № 3. – P. 52-55.
- 4 **Keller, A., Malaspina, D.** Hidden consequences of olfactory dysfunction: a patient report series. *BMC Ear, Nose and Throat Disorders*, 2013, – 13:8. – P.20
- 5 **Merkulov, O. A.** Endoskopicheski assistirovanny endonazal'nyy pokhod v khirurgicheskom lechenii estezieneroblastomy u detey. *Opukholi golovy i shei*. – Moskva, 2012. – № 1. – S. 37 - 41.
- 6 **Alekseeva, N. S., Aznabaeva, L. F., Antoniv, V. F. et. al.** Otorinolaringologiya / Pod red. **V. T. Pal'chuna** – M: GEOTAR-Media, – 2009 – 954 s.
- 7 **Savvateeva, D. M.** Klinicheskie osobennosti perifericheskikh obonyatel'nykh rasstroystv: avtoref. dis. kand. med. nauk: 14.01.03 / *Pervyy Mosk. gos. med. un-t im. I. M. Sechenova*. – Moskva: 2011. – 24 s.
- 8 **Avrunin, O. G.** Vizualizatsiya verkhnikh dykhatel'nykh putey po dannym komp'yuternoy tomografii. *Radioelektronika i informatika*. – 2007. – № 4. – S. 119-122.
- 9 **Hirabayashi, H., Hariz, M. I., Fagerlund, M.** Comparison between stereotactic CT and MRI coordinates of pallidal and thalamic targets using the Laitinen noninvasive stereoadapter. *Stereotact. funct. Neurosurg*, 1998. – Vol. 71, – № 3. – P. 117–130.
- 10 **Farouk, H., Avrunin, O.** Comparison Discriminate Characteristics Between Modern TNDA-PRH Rhinomanometer And Previously Methodology. *International Journal of General Engineering and Technology (IJGET)* ISSN 2278-9928. – 2013 – Vol. 2, Is. 2, – P. 39-50.
- 11 **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. – Vol. 102. – S. 303-310.
- 12 **Kwon, J., Barrera, J., Most, S.** Comparative computation of orbital volume from axial and coronal CT using three-dimensional image analysis. *Ophthal. Plast. Reconstr. Surg.* – 2010. – № 26 (1). – P. 26-29.

Поступила (received) 23.06.2015

УДК 611.737.7:615.47

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ МЕЛКОГО МОТОРНОГО РАЗВИТИЯ

К. Г. СЕЛИВАНОВА¹, Ж. Б. ИВАНЧЕНКО², О. Г. АВРУНИН¹

¹ Кафедра биомедицинской инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

² Институт микробиологии и иммунологии им. И. И. Мечникова НАМН Украины, Харьков, УКРАИНА
e-mail: bykh@kture.kharkov.ua

АННОТАЦИЯ У статті описані принципи побудови біотехнічної та функціональної систем, показано взаємозв'язок і взаємодія підсистем та їх елементів. Для вирішення актуальної задачі дослідження була розроблена біотехнічна система (БТС), яка дозволяє оцінити стан мілкового моторного розвитку (ММР), а також діагностувати можливі первинні порушення моторної сфери. Діагностика станів ММР підрозділяється на п'ять видів: норма, зміна, відхилення, порушення, патологія.

Ключові слова: біотехнічна система, функціональна система, мілкий моторний розвиток, стан моторної сфери, процес діагностування

АННОТАЦИЯ В статье описаны принципы построения биотехнической и функциональной систем, показаны взаимосвязи и взаимодействие подсистем и их элементов. Для решения актуальной задачи исследования была разработана биотехническая система (БТС), которая позволяет оценить состояние мелкого моторного развития (ММР), а также диагностировать возможные первичные нарушения моторной сферы. Диагностика состояний ММР подразделяется на пять видов: норма, отклонение, изменение, нарушение, патология.

Ключевые слова: биотехническая система, функциональная система, мелкое моторное развитие, состояние моторной сферы, процесс диагностирования

BIOTECHNICAL DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE CONDITION FINE MOTOR DEVELOPMENT

K. G. SELIVANOVA¹, Z. B. IVANCHENKO², O. G. AVRUNIN¹

¹ Department of Biomedical Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkov, UKRAINE

² Institute of Microbiology and Immunology named after I. I. Mechnikov, NAMS of Ukraine, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Everyone has the individual properties of hand movement, which include writing and drawing, pressing force, the various manipulations of small objects, work on the keyboard, etc. A fine motor skill is a sequence of fine hand movements to perform a specific task. A lot of movement disorders in the early stages appear as violations of fine hand movements. Therefore, actual task is as early as possible to identify possible violations of fine motor skills. The use of computer technology in this type of research reduces the role of the subjective factor.

The article describes the principles of biotechnology and functional systems that show the relationship and interaction of subsystems and their components. For decide actual tasks of the research was developed biotechnical diagnostic system, which allows to assess the state of fine motor development, also diagnose possible primary disturbances in motor field. Diagnosis states of fine motor skills divided into five types: norm, change, deviation, disorder pathology. The paper provides a set of basic parameters that serves as criteria for performance evaluation methodology. The analysis of the tests results is carried out with a computer program that allows determining the level of development of motor skills based on quantitative assessments.

Keywords: biotechnical system, functional system, fine motor development, the state of the motor skills, the process of diagnosis

Введение

Мелкое моторное развитие (ММР) представляет собой мелкие движения, которые требуют тонкой мышечной координации, когда необходим точный контроль. Проблема уровня развития ММ весьма актуальна в любом возрасте (младенчестве, дошкольном, младшем школьном, подростковом и взрослом), так как именно она отвечает за развитие сенсомоторики –

согласованности зрительной реакции и двигательной активности, совершенствованию координации движений, концентрации внимания, мыслительной деятельности, гибкости, точности в выполнении заданий, коррекции ММ пальцев рук. Особое внимание заслуживает изучение вопроса нарушений моторной сферы для дальнейшего диагностирования возможных заболеваний нервно-мышечной системы [5, 7, 10]. Это становится возможным с применением биотехнической системы (БТС), которая на основе

взаимодействия биологических объектов с техническими средствами, расширяет возможности клинициста и позволяет ему в режиме реального времени проводить качественный анализ причин возникновения расстройств моторной сферы, а также прогнозирование их течения на выбранную тактику решений [2].

Цель работы

Целью данной работы является разработка БТС для оценки состояния ММП и диагностирования возможных нарушений моторной сферы.

В условиях использования традиционных методов и средств диагностики двигательных расстройств важной задачей является повышение эффективности и доступности в изучении состояния ММ.

Изложение основного материала

Разработка биотехнических систем необходимо для формализации требований к техническим средствам регистрации физиологических параметров, их структуре, алгоритмам обработки полученных данных, анализу диагностических показателей [8].

БТС представляет собой систему, биологические и технические элементы которой связаны между собой для выполнения заданной целевой функции. Наиболее часто задается система выражением, которое имеет в своей структуре входные и выходные параметры, описывающих внутреннее состояние и поведение БТС:

$$Y = F(X, V), \quad (1)$$

где X - входные параметры;

Y - выходные параметры;

V - собственные параметры системы;

F - преобразование системы, определяющее поведение системы.

Реализация целевой функции БТС осуществляется путем диагностирования функциональных изменений моторной сферы и разграничение состояния обследуемых на 5 групп: «норма» (отсутствие диагностируемого состояния), «отклонение» (вероятное наличие состояния), «изменение» (небольшое отклонение от допустимых значений), «нарушение» (наличие диагностируемого состояния), «патология» (заболевание) [8, 9].

Двигательные нарушения выступают ведущим фактором и представляют собой своеобразную аномалию ММП, которая без соответствующей коррекции оказывает неблагоприятное воздействие на весь ход формирования нервно-психических функций человека. Это является одной из основных причин социальной изоляции в обществе, временной нетрудоспособности, экономическим потерям,

умственной отсталости детей дошкольного и младшего школьно возраста.

Одной из путей предупреждения нарушений является их раннее выявление. Диагностические методы, существующие для этой цели, основаны на обработке данных, полученных в результате обследования пациента и регистрации реакций организма на тестовое воздействие.

Для формализации системы выбираются основные такие параметры:

x_1 - пол обследуемого человека;

x_2 - возраст;

x_3 - ведущая рука;

x_4 - наличие жалоб и образ жизнедеятельности;

v_1 - скорость сенсомоторной реакции;

v_2 - сила давления или нажима рукой;

v_3 - точность и правильность выполнения тестов;

v_4 - уровень развития ММ.

Исходя из заданных параметров, можно выделить такие выходные параметры, которые характеризуют различные состояния ММП:

y_1 - «норма»;

y_2 - «изменение»;

y_3 - отклонение;

y_4 - «нарушение»;

y_5 - «патология».

Таким образом, окончательный вид работы диагностического блока разработанной БТС, обеспечивающего выполнение целевой функции, имеет вид:

$$Y = \begin{cases} y_1, & \text{если } v_1 = \max, v_2 = \text{mean}, v_3 = \max, v_4 = \max; \\ y_2, & \text{если } v_1 = \text{mean}, v_2 = \text{mean}, \max, \min, v_3 = \max, v_4 = \max; \\ y_3, & \text{если } v_1 = \text{mean}, v_2 = \max, \min, v_3 = \text{mean}, v_4 = \text{mean}; \\ y_4, & \text{если } v_1 = \text{mean}, \min, v_2 = \max, \min, v_3 = \text{mean}, \min, v_4 = \min; \\ y_5, & \text{если } v_1 = \min, \min, v_2 = \max, \min, v_3 = \min, \min, v_4 = \min; \end{cases} \quad (2)$$

Качество выполнение целевой функции системы может быть оценено с помощью исследования функциональных характеристик. В нашем случае таковыми являются заданные параметры, значения которых варьируются от минимального к максимальному, что при анализе дает возможность определить диагностируемое состояние ММП [8, 9].

Обсуждение результатов

Первым этапом разработки БТС для данного вида исследований является построение функциональной системы, так как она поясняет механизм двигательной активности человека (рис. 1). Этот вид деятельности имеет очень широкий

диапазон работы – от мышечных координаций, требуемых для ручных манипуляций перемещения тела в пространстве до мелких движений пальцев (ММ).

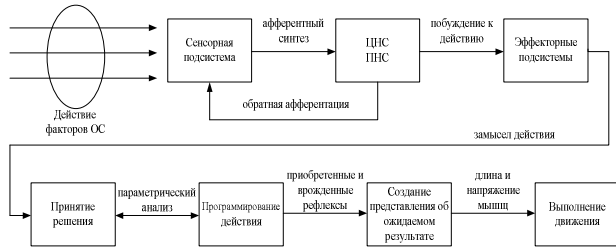


Рис. 1 – Обобщенная структурная схема функциональной системы организации двигательной активности

Данная система основана на физиологическом уровне строения и функционировании человека. Под действием окружающей среды (ОС) подразумевается действие внешних раздражителей, которые вызывают соответствующие реакции организма. Это влияние регистрируют рецепторы (сенсорная система), где, собственно, происходит афферентный синтез, т.е. анализ и создание стимула для принятия решения, а затем включает дальнейшую обратную обработку. Все это контролирует ЦНС (головной и спинной мозг) и ПНС (черепные и спинномозговые нервы), после этого возникает побуждение к действию. Эффекторные подсистемы представлены двигательным отделом (мотонейроны, мышечные волокна), где происходит замысел действия, и только после этого включается процесс принятия решения и выполнение программы действия. Функционирование данной системы подчиняется главному закону: план-программа-выполнение, при этом допускается анализ полученного результата и внесение сенсорных коррекций в программу.

Принцип построения диагностической БТС основан на непосредственном взаимодействии пациента с врачом (рис. 2).



Рис. 2 – Схема взаимодействия пациента с врачом

Данная схема иллюстрирует то, что предметом взаимодействия врача и пациента является проблема или жалоба, с которой обращается пациент, а врач решает как помочь ему в этом вопросе посредством использования различных технических средств и методов функциональной диагностики.

Следующим этапом для разработки БТС является изучение принципа взаимодействия биологической и технической составляющей в виде

построения макета, который демонстрирует основные характеристики и параметры аппаратной и программной части (рис. 3).

Техническим оснащением служит графический или сенсорный планшет, на котором выполняется тестирование обследуемым для оценки состояния ММР. Компьютерные технологии реализованы в среде объектно-ориентированного программирования Delphi XE3. Программное средство (ПС) имеет

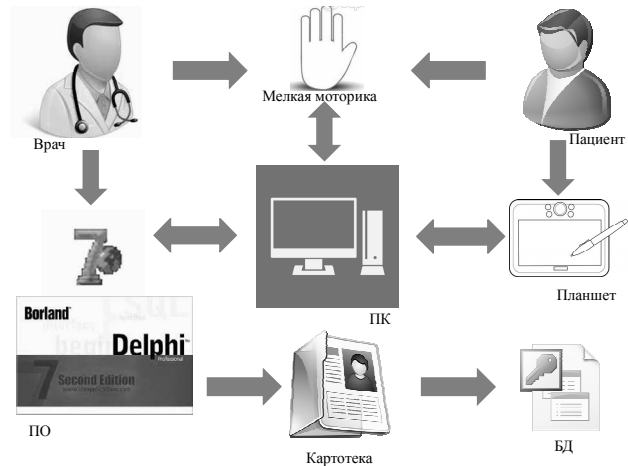


Рис. 3 – Схематический вид макета диагностической системы

довольно простой интерфейс, не требует дополнительного администрирования, настройки с минимальными системными требованиями. Также с помощью автоматизированных ресурсов можно быстро и качественно обрабатывать клиническую информацию с занесением их в базу данных (БД).

Завершающим этапом разработки БТС является процесс формирования, который включает подробное описание подсистем и их элементов с указанием прямых и обратных связей.

Предложенная БТС диагностики состояния ММР состоит из двух основных частей: биологической, которая включает пациента, врача и биомедицинского инженера; технической, подразделяющаяся на аппаратную и программную подсистему (рис. 4).

В аппаратную подсистему входит ПК, планшет и устройство сопряжения. Программная часть состоит из восьми основных блоков: ввода/вывода данных, тестирования, обработки, анализа, блок оценки состояния ММР, блок формирования диагностического заключения, блок хранения данных (БД). На каждом этапе обследования пациента участвует врач, который ведет опрос, собирает анамнез, проводит тестирование и наблюдает за его прохождением. Биомедицинский инженер следит за настройкой и наладкой как аппаратного оснащения так программного обеспечения. Также контролирует процесс тестирования и следит за выполнением

абсолютно одинаковых условий доклинических испытаний.

Блок ввода данных представляет собой регистрацию пациентов и использование интерфейса пользователя. Блок тестирования заключается в отображении различных видов шаблонов заданий для определенного вида исследований. Блок обработки данных показывает количество пропущенных, правильно и технически неверно выполненных тестов. Блок анализа данных позволяет проанализировать силу нажима, скорость сенсомоторной реакции, отклонение параметров эталонного задания от экспериментального. Блок

оценки состояния ММР базируется на расчетах точности выполнения тестов, уровня развития мелкой моторики, наблюдении синкинезий, учета физиологических показателей нервно-мышечной системы. Блок формирования диагностического заключения возможен при просмотре и редактировании врача, проверке всех показателей и трактовке верного диагноза. Вся клиническая и доклиническая информация о пациенте, а также процедура тестирования и результаты исследования хранятся в БД.

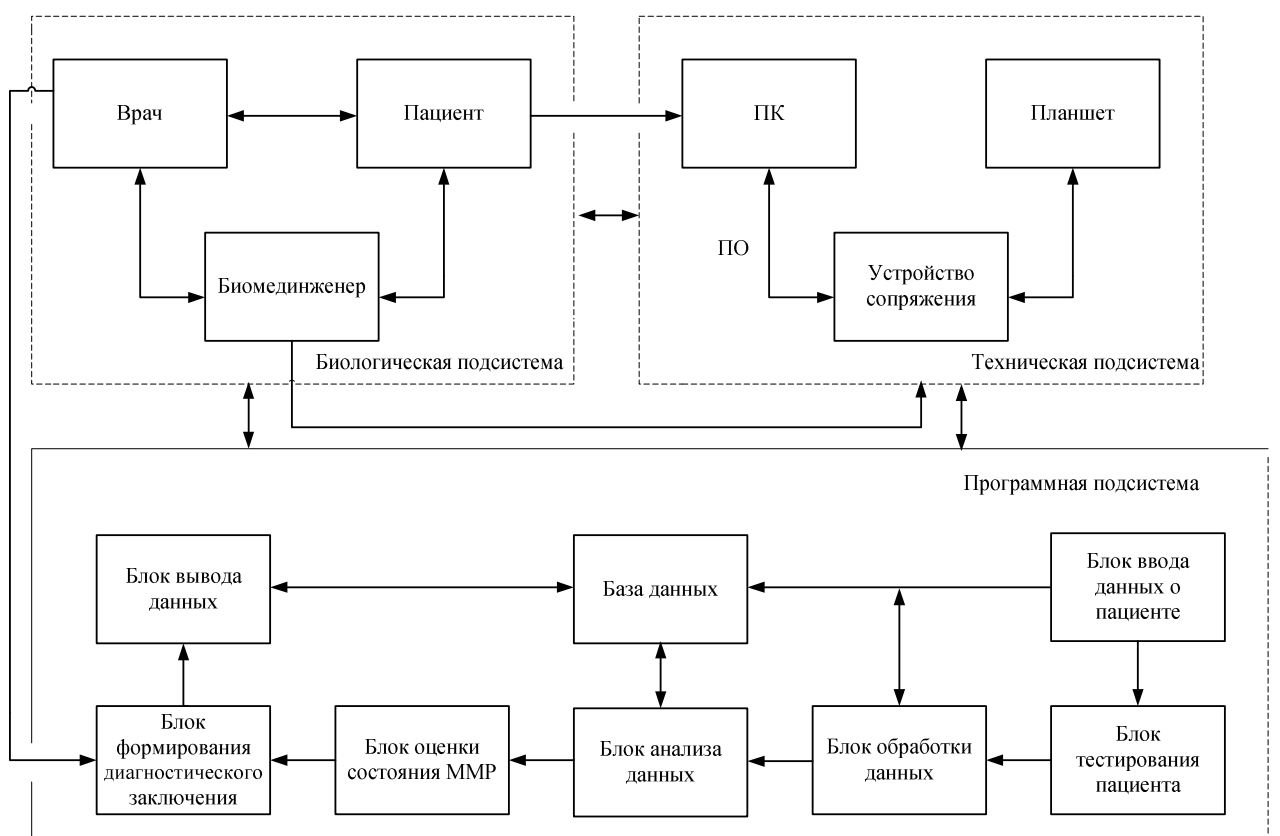


Рис. 4 – Биотехническая система диагностики состояния мелкого моторного развития

Выводы

Повышение общей эффективности разработанной биотехнической системы диагностики состояния ММР обеспечивается за счет использования современных методов и средств исследования и подтверждается повышением качественного результата при выполнении целевой функции в заданных условиях. Также система позволяет учитывать ряд индивидуальных особенностей пациента и произвести расчет информативных параметров, для повышения

достоверности ранней диагностики. Простота и доступность понимания функционального назначения разработанной БТС позволяет внедрять ее в ежедневную практику медицинских учреждений. Перспективой данной работы является разработка виртуального тренажера развития мелкой моторики детей дошкольного и младшего школьного возраста, а также отдельное применение для коррекционной школы.

Список литературы

1. **Patent** № WO 2008128192 A1 “Vision cognition and coordination testing and training”. Inventors: Ryan Coulter, Alan W. Reichow, Herb Yoo. Date of Patent: Oct. 23, 2013.
2. **Moore, J.** Biomedical technology and devices. Handbook / Edited by J. Moore – CRC Press LLC. – 2004. – 750 p.
3. **Leslie, J. Couse, A** Tablet Computer for Young Children? Exploring Its Viability for Early Childhood Education / **Leslie, J. Couse, Dora W. Chen** // *Journal of Research on Technology in Education*. – 2010. – Volume 43, Number 1, P. 75-98.
4. **Diah Norizan Mat** A Development of a Computer-Assisted Software (AJaW) That Encourages Jawi Writing for Children / **Diah Norizan Mat, M. Ismail, M. A. Hamid Putri, S. Ahmad** // *Journal Education*. – 2012. – Volume 2(5). – P. 130-135.
5. **Selivanova, K. G.** A method of computer testing of the level of development of graphic skills / **K. G. Selivanova, O. G. Avrunin, H. I. Faruk** // *International Journal of Computer Science and Engineering (SJCSE)*. – Mar 2014. – Vol. 3, Issue 2. – P. 19-26.
6. **Mevludin Memedi** Mobile systems for monitoring Parkinson's disease / **Mevludin Memedi** // *Thesis summary, Orebro University*. – 2011. – 56 p.
7. **Selivanova, K. G.** Method of hand movement testing on graphic tablet / **K. G. Selivanova, O. G. Avrunin** // *Materials of the first Russian-German Conference on Biomedical Engineering (RGC-2013)*. – 2013. – 58 p.
8. **Акулов, С. А.** Основы теории биотехнических систем. / **С. А. Акулов, А. А. Федотов** – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 259 с.
9. Биотехнические системы: теория и проектирование / Под ред. **В.М. Ахутина**. – Л.: Издательство ЛГУ. – 1981. – 204 с.
10. **Селиванова, К. Г.** Разработка метода автоматизированного тестирования мелкой моторики ведущей руки на графическом планшете. / **К. Г. Селиванова, О. Г. Аврунин** // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2013. – Том 12, №3. – С. 459-465.

Bibliography (transliterated)

1. **Patent** № WO 2008128192 A1 “Vision cognition and coordination testing and training”. Inventors: Ryan Coulter, Alan W. Reichow, Herb Yoo. Date of Patent: Oct. 23, 2013.
2. **Moore, J.** Biomedical technology and devices. Handbook / Edited by J. Moore – CRC Press LLC. – 2004. – 750 p.
3. **Leslie, J. Couse, Dora, W. Chen** A Tablet Computer for Young Children? Exploring Its Viability for Early Childhood Education. *Journal of Research on Technology in Education*. – 2010. – Volume 43, Number 1. – P. 75-98.
4. **Diah Norizan Mat, Ismail, M., Hamid Putri, M. A., Ahmad, S.** A Development of a Computer-Assisted Software (AJaW) That Encourages Jawi Writing for Children / *Journal Education*. – 2012. – Volume 2(5). – P. 130-135.
5. **Selivanova, K. G.** A method of computer testing of the level of development of graphic skills / **K. G. Selivanova, O. G. Avrunin, H. I. Faruk** // *International Journal of Computer Science and Engineering (SJCSE)*. – Mar 2014. – Vol. 3, Issue 2. – P. 19-26.
6. **Mevludin Memedi** Mobile systems for monitoring Parkinson's disease. *Thesis summary, Orebro University*. – 2011. – 56 p.
7. **Selivanova, K. G., Avrunin, O. G.** Method of hand movement testing on graphic tablet / *Materials of the first Russian-German Conference on Biomedical Engineering (RGC-2013)*. – 2013. – 58 p.
8. **Akulov, S. A., Fedotov, A. A.** Fundamentals of the theory of biotechnical systems / Moscow: FIZMATLIT. – 259 p.
9. Biotechnical system theory and design / Ed. **V. M. Akhutina** / L.: LGU Publishing. – 1981. – 204 p.
10. **Avrunin, O. G., Selvanova, K. G.** Development of a method of automated testing fine motor skills leading hand on graphic tablet / *Applied Radio electronics: Scientific and engineering Journal*. – 2013. – Volume 12. № 3. – P. 459-465.

Поступила (received) 25.06.2015

УДК 004.932

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ, СМАЗАННЫХ СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Н. С. СОКОВИКОВА¹, В. Е. САВАНЕВИЧ^{1*}, А. Б. БРЮХОВЕЦКИЙ², М. М. БЕЗКРОВНЫЙ³

¹ Кафедра электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА

² Харьковское представительство генерального заказчика Государственного космического агентства Украины, Харьков, УКРАИНА

³ Запорожский институт экономики и информационных технологий, Запорожье, УКРАИНА

* email: vadyum@savanevych.com

АННОТАЦИЯ Розроблено метод виділення зображень небесних об'єктів, змазаних власним рухом. Для цього перш за все досліджена множина можливих селективних ознак. Запропонований метод включає в себе три етапи, один з яких виконується під час внутрішньокадрової обробки, а два інших – під час міжкадрової обробки серій кадрів однієї ділянки зоряного неба. В роботі наведені результати експериментальних досліджень розподілу селективних ознак, що використовуються, та частот хибних виявлень на етапах роботи методу. Запропонований метод може бути використаний для виявлення об'єктів з високою швидкістю видимого руху в програмах астероїдних оглядів.

Ключові слова: протяжні зображення, стробовий метод, астероїди, ПЗС-кард

АННОТАЦИЯ Разработан метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением. Предложенный метод включает в себя три этапа, один из которых выполняется при внутрикадровой обработке, а два других - во время межкадровой обработки серии кадров участка звездного неба. В работе приведены результаты экспериментальных исследований распределения используемых селективных признаков и частот ложных обнаружений на этапах работы метода. Предложенный метод может быть использован для обнаружения объектов с высокой скоростью видимого движения в программах астероидных обзоров.

Ключевые слова: протяженные изображения, стробовый метод, астероиды, ПЗС-кард

DEVELOPMENT OF METHOD FOR IMAGE DETECTION OF CELESTIAL TRAILED OBJECTS GREASED BY OWN MOVEMENT

N. SOKOVIKOVA¹, V.SAVANEVYCH^{1*}, O. BRIUKHOVETSKYI², M. BEZKROVNIY³

¹ Department of electronic computers, Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, UKRAINE

² Kharkiv general customer office of the State Space Agency of Ukraine, Kharkov, UKRAINE

³ Zaporozhye Institute of Economics and Information Technology, Zaporozhye, UKRAINE

* email: vadyum@savanevych.com

ABSTRACT Celestial objects with high visible speed can have an image which is smeared its own movement. Typically, these characteristics correspond to asteroids approaching the Earth. Observation and detection of such objects is of special interest due to the urgent problem of the asteroid hazard. The purpose of this article is to provide the method for selecting images of celestial objects, trailed its own movement. The proposed method consists of three phases, the first of which corresponds to intraframe processing, and the other two - interframe. In the first stage are selected the images that have trailed attributes. In the second stage from the set of trailed images selected in the first stage, are excluded those that include are at least two circular images of famous stars or star caught in the generated internal directory of the objects fixed on a series of frames. The third stage: trailed images are combined into a series of trailed images of a hypothetical object using the developed method of strobe class. After excluding from consideration of objects from internal directory, objects with zero apparent motion in the second stage of the method, of the total amount remained just 1% of the measurements corresponding to the trailed image which hypothetically may belong to objects with the speed of apparent movement sufficient for the image trail of the object due to its own movement. After using the 3 steps of the method, the false detection of objects with high visible speed of motion in the experimental investigations are not found. We present the results of experimental studies of the distribution of used selective characteristics and frequencies of false detections in the stages of the method. The proposed method can be used to detect objects with high rate of apparent motion in the programs for observation of asteroids.

Keywords: trailed object, strobe method, asteroid, CCD-frame

Введение

Объекты изображения, которых смазаны собственным движением, могут иметь весьма

разное происхождение. Примерами объектов со смазанными изображениями могут быть: самолеты, искусственные спутники Земли, пролетающие снаряды, беспилотные летательные

аппараты (дроны). Из естественных такими объектами могут быть: астероиды, сближающиеся с Землей, кометы, метеоры, птицы и т.д. Наблюдение и обнаружение (выделение) астероидов со смазанными изображениями, как правило, проводится при помощи телескопов со сравнительно небольшими апертурами. При наблюдении и изучении таких объектов указанными средствами наблюдения могут возникать некоторые сложности (из-за их размера, удаленности или скорости). Для их разрешения возникает необходимость в создании вычислительных методов и специализированного ПО обработки результатов их обнаружения и наблюдения.

Научное направление автоматической компьютеризированной обработки ПЗС-кадров [1] является достаточно новым и продолжает развиваться вместе с совершенствованием средств наблюдений на основе ПЗС. Методам обработки ПЗС кадров с изображениями объектов, смазанных собственным движением, посвящены следующие работы: Куприянов В. [2], Bauer T. [3], Zhai C. [4], Vereš P. [5]. Однако описанные методы определения параметров изображений протяженных объектов не всегда соответствуют выдвигаемым к ним требованиям. Поэтому актуальной является научно-техническая задача разработки эффективных вычислительных методов обработки цифровых изображений для выделения объектов, смазанных собственным движением.

протяженное изображение, иными словами, изображение, смазанное собственным движением. Данными объектами могут быть либо астероид, сближающийся с Землей, либо метеор, либо другой небесный объект с большим видимым движением на серии кадров N_{fr} .

Предварительные исследования показывают, что на этапе обнаружения в качестве модели видимого движения объекта с высокой угловой скоростью, достаточно использовать линейную модель с независимым видимым движением объекта вдоль каждой координаты:

$$x_{jt} = x_{0j} + V_{xj}(\tau - \tau_0); \tag{1}$$

$$y_{jt} = y_{0j} + V_{yj}(\tau - \tau_0), \tag{2}$$

где τ – время;

τ_0 – время привязки базового кадра;

V_{xj}, V_{yj} – скорости объекта по координатам x и y соответственно;

x_{jt}, y_{jt} – координаты j -го изображения объекта на момент τ ;

x_{0j}, y_{0j} – положение протяженного объекта на время τ_0 привязки базового кадра.

Необходимо на исследуемой серии кадров выявить протяженные изображения (изображения объектов, смазанных собственным движением).

Цель работы

Целью данной статьи является разработка метода выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением.

Разработка метода выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением

Постановка задачи.

Исследуется наблюдение объектов с помощью оптического средства (телескопа), оснащенного ПЗС-матрицей. По результатам наблюдений одного участка небесной сферы формируется серия из N_{fr} цифровых ПЗС-кадров с временем привязки t -го кадра серии τ_n . Один из кадров серии называется базовым, а время его привязки считается равным τ_0 (как правило, время привязки среднего кадра серии, которое соответствует времени половины экспозиции указанного кадра).

Объекты с высокой угловой скоростью (большим видимым движением – 10 пикселей за время экспозиции) на ПЗС кадрах имеют

Суть метода выделения изображений объектов, смазанных собственным движением

К сожалению, решить данную задачу с приемлемым качеством обнаружения на этапе внутрикадровой обработки не удастся. В этой связи, в работе задача решается в три этапа, один из которых соответствует внутрикадровой обработке, а два других – межкадровой.

Этап 1. При внутрикадровой обработке выделяются изображения, обладающие признаками протяженных.

Этап 2. Из множества протяженных изображений, выделенных на первом этапе, исключаются те, которые включают в себя хотя бы два круговых изображения известных звезд или звезд, попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров.

Этап 3. Протяженные изображения (по одному на каждом кадре) объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта с использованием метода из класса стробовых. В заключение, принимается решение о наличии изображений объектов, смазанных собственным движением.

Модель входних даних

На етапі внутрикадрової обробки описання (модель) зображення об'єкта, смазанного своїм власним рухом, відповідає описанню, приведенному в розділі 2.1.2.

В свою чергу, результати внутрикадрової обробки по одному об'єкту одного кадру представляються в вигляді вимірювання Y_{in} (i -е вимірювання t -го кадру). Так як вимірювання по досліджуваному зображенню об'єктів можуть бути сформовані не на кожному кадрі, то має місце серія вимірювань (не більше ніж по одному з кадру) досліджуваного протягнутого об'єкта, гіпотетично приналежних йому:

$$Y = (Y_{1(i,1)}, \dots, Y_{n(i,t)}, \dots, Y_{N_{mea}(i, N_{fr})}), \quad (3)$$

де $n(i,t) = n$ – номер вимірювання в серії вимірювань досліджуваного об'єкта, яке є i -м вимірюванням t -го кадру серії, гіпотетично приналежним досліджуваному об'єкту;

N_{mea} ($N_{mea} \leq N_{fr}$) – кількість вимірювань положення об'єкта на N_{fr} кадрах.

В роботі використовується прямокутна система координат (СК) ПЗС-кадру з центром в лівому верхньому куті ПЗС-кадру.

В випадку кругового (не протягнутого) зображення, відповідне йому i -е вимірювання t -го кадру містить оцінки: координат $\hat{x}_{jt}, \hat{y}_{jt}$ j -го зображення об'єкта на момент τ_0 прив'язки кадру; теоретичної амплітуди \hat{A}_{jt} піка зображення j -го гіпотетичного об'єкта; параметра $\hat{\sigma}_{jt}$ форми зображення j -го гіпотетичного об'єкта на t -ом ПЗС-кадру. В якості оцінок положення $\hat{x}_{jt}, \hat{y}_{jt}$ можуть використовуватися оцінки $\hat{x}_{jt}(\Theta_{noise}^{sub}), \hat{y}_{jt}(\Theta_{noise}^{sub})$, засновані на субпіксельній моделі зображення об'єктів, метод отримання яких описаний в роботі [6].

Для виділення зображень протягнутих об'єктів к вищеописаним параметрам додатково оцінюються те, які будуть використані для виявлення протягнутих об'єктів на етапі внутрикадрової обробки. К ним належать оцінки: кута ω_j між напрямком руху j -го об'єкта і осью абсцис в системі координат ПЗС-кадру; швидкості $\hat{V}_{xj}, \hat{V}_{yj}$ видимого руху об'єкта по координатам x і y відповідно. Замість оцінок швидкостей видимого руху або разом з

ними може використовуватися відповідна їй довжина шляху d_j (в пікселях), пройденого j -м об'єктом за час експозиції, яка також є довжиною зображення j -го об'єкта.

При оцінці координат положення зображення об'єкта передбачається, що на кадрі, згідно [1], проведена сегментація зображень – виділено множество пікселів Ω_j , віднесених до зображення j -го об'єкта з N_{Ω_j} об'єктів на кадрі. Причому сума яркостей пікселів множини Ω_j є інтегральною яркістю досліджуваного зображення об'єкта (4):

$$A_{\Omega_j} = \sum_{i,k=0}^{\Omega_j} A_{ik}^*, \quad (4)$$

де A_{Ω_j} – інтегральна яркість досліджуваного об'єкта;

A_{ik}^* – експериментальна яркість ik -го пікселя ПЗС-матриці.

Селективні ознаки зображення протягнутих об'єктів на етапі внутрикадрової обробки

Зображення об'єктів небесних тіл на ПЗС-кадру мають різну форму. Для виявлення небесних об'єктів з протягнутими зображеннями на дискретному зображенні кадру в роботі використана характеристика їх витягнутості. В якості ступеня витягнутості зображення в роботі використовується оцінка його ексцентриситету $\hat{\epsilon}$. Значення ексцентриситету змінюється в діапазоні від 0 до 1. Він дорівнює нулю, якщо зображення об'єкта має форму кола, і дорівнює одиниці для зображення об'єкта в формі лінії [7] (рис.1, табл.1).

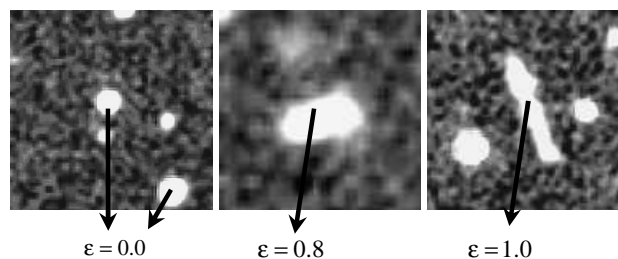


Рис. 1 – Приклади зображень об'єктів (від кругових до витягнутих)

Таблица 1. Значение эксцентриситета изображений относительно соотношения длин их осей.

Отношение осей изображений	$\hat{\epsilon}$
10:10	0.0
12:10	0.47
14:10	0.61
16:10	0.69
18:10	0.75
20:10	0.79
25:10	0.85
30:10	0.88
35:10	0.91
40:10	0.93

Оценка вытянутости и ориентации изображения объекта

Оценку эксцентриситета изображения объекта в рассматриваемом случае удобно выражать через оценки центральных моментов второго порядка [7].

Для определения эксцентриситета изначально необходимо оценить моменты первого порядка [7]:

$$X_0 = \frac{\sum_{k,i} A_{ik}^* x_{it}}{\sum_{k,i} A_{ik}^*} ; Y_0 = \frac{\sum_{k,i} A_{ik}^* y_{kt}}{\sum_{k,i} A_{ik}^*} , \quad (5)$$

где x_{it}, y_{kt} – координаты центра ik -го пикселя t -го кадра ПЗС-матрицы.

Кроме того, необходимо найти моменты второго порядка:

$$m_{20} = \sum_{k,i} A_{ik}^* (x_{it} - X_0)^2 , \quad (6)$$

$$m_{02} = \sum_{k,i} A_{ik}^* (y_{kt} - Y_0)^2 , \quad (7)$$

$$m_{11} = \sum_{i=1}^{\Omega_j} \sum_{k=1}^{\Omega_j} A_{ik}^* (x_{it} - X_0)(y_{kt} - Y_0) . \quad (8)$$

На основании полученных данных можно вычислить оценку эксцентриситета [7]:

$$\hat{\epsilon}_j = \frac{m_{20} + m_{02} - \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}}{m_{20} + m_{02} + \sqrt{(m_{20} - m_{02})^2 + 4m_{11}^2}} . \quad (9)$$

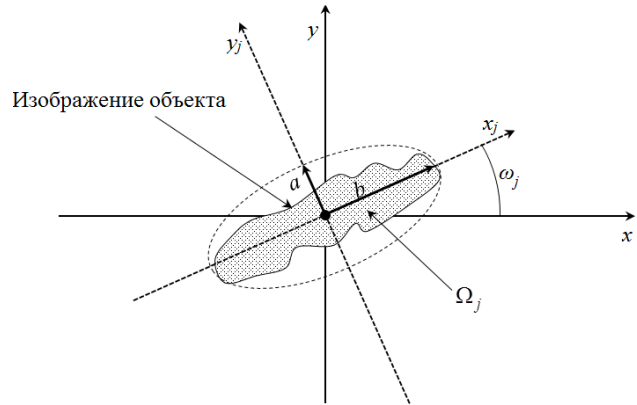


Рис. 2 – Направление осей вытянутости изображения объекта

Ориентация изображения объекта (рис.2) определяется углом ω_j между осью x и осью x_j , в направлении которой изображение объекта является наиболее вытянутым.

Согласно уравнению (10), данный угол ω_j отклонения оси x_j от оси x определяется соотношением [7]:

$$\omega_j = \frac{1}{2} \arctan \frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}} . \quad (10)$$

Известно, что арктангенс определен на интервале $[-\pi/2, \pi/2]$. Для его определения на требуемом интервале $[0, \pi]$ необходимо принять ряд обычных для такого случая мер.

Выделение протяженных изображений на этапе внутрикадровой обработки

Изображение протяженного объекта не отличается от изображения нескольких объектов расположенных друг за другом на одном кадре. Поэтому безошибочное выделение искомым объектов с большим видимым движением по эксцентриситету не возможно.

Объекты искомого класса имеют протяженное изображение, то они, как правило, ближе расположены к наблюдателю, чем круговые объекты. Чаще всего это приводит к большому значению интегральной яркости их изображений. Интуитивно понятно, что протяженное изображение, соответствующее объекту, смазанному собственным движением, имеет значительный эксцентриситет и большую интегральную яркость (рисунок 3), а значит и отношение сигнал-шум (рисунок 6).

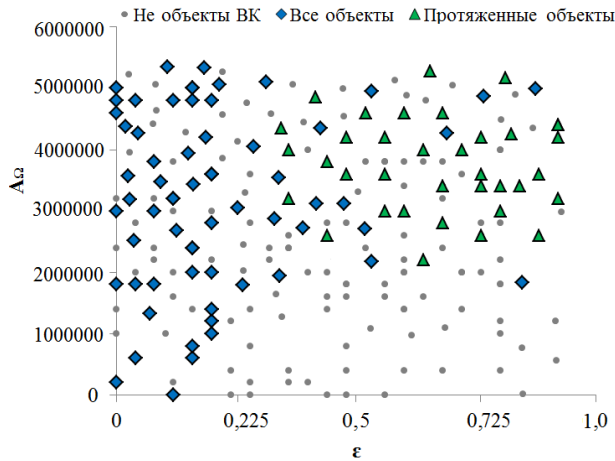
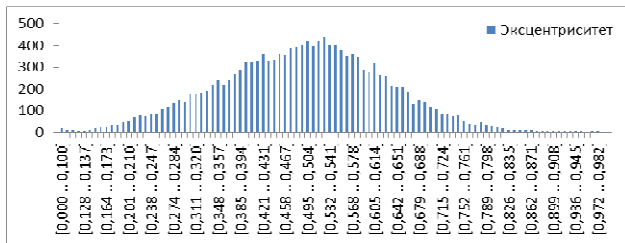
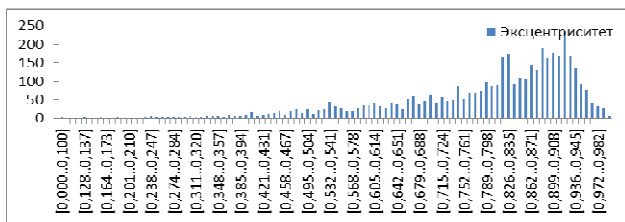


Рис. 3 – Зависимость яркости изображения объектов от значения эксцентриситета для объектов в форме круга и протяженных объектов

На рисунке 5 представлены эксцентриситеты изображений гипотетических объектов UCAC4 и изображений, соответствующих протяженным объектам. Сравнительный анализ рисунков 5а и 5б свидетельствует о селективности эксцентриситета изображения при выделении объектов с протяженными изображениями. С другой стороны данная селективность не настолько высока, чтобы признак эксцентриситета обеспечивал безошибочную различимость рассматриваемых гипотез.



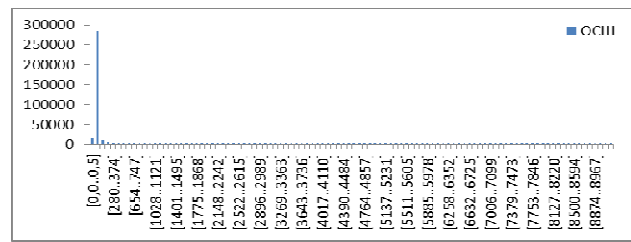
а)



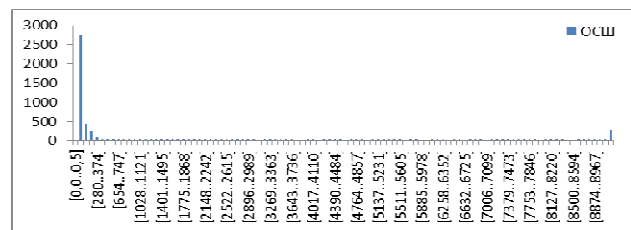
б)

Рис. 4 – Распределение измерений по диапазонам эксцентриситета: а) измерения, отождествленные с астрокаталогом UCAC4; б) измерения протяженных объектов

Анализ значений отношения сигнал-шум всех изображений и изображений, соответствующих протяженным объектам представлен на рисунках ба и бб соответственно.

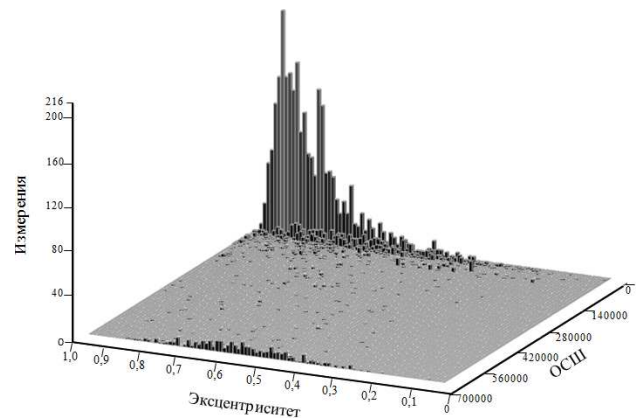


а)

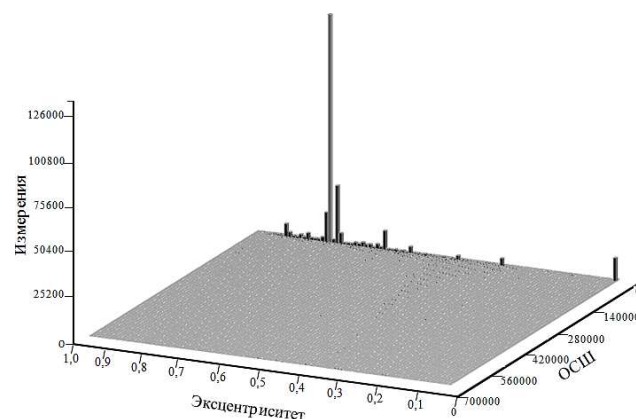


б)

Рис. 5 – Распределение измерений по диапазонам ОСШ: а) измерения всех объектов; б) измерения протяженных объектов



а)



б)

Рис. 6 – Распределение измерений объектов на плоскости ОСШ-Эксцентриситет: а) все измерения; б) протяженные измерения

На рисунке 6 представлено распределение измерений всех объектов (рисунок 6а) и измерений, соответствующих протяженным объектам (рисунок 6б), на плоскости ОСШ-Эксцентриситет.

Из рисунков 6а и 6б видно, что совместное использование эксцентриситета изображения и его ОСШ обладает большей селективностью, чем раздельное использование рассматриваемых признаков.

Исходя из изложенного выше на этапе внутрикадровой обработки изображение объекта считается протяженным, если выполняются условия:

$$\hat{\epsilon}_j > \epsilon_{kr}; \tag{11}$$

$$\hat{q}_j > q_{kr}, \tag{12}$$

где

$$\hat{q}_j = A_{xy} / \hat{\sigma}_{noise} \tag{13}$$

– оценка отношения сигнал-шум;

$\hat{\sigma}_{noise}$ – оценка СКО яркости фона.

Критические значения эксцентриситета ϵ_{kr} и отношения сигнал-шум q_{kr} выбираются из экспериментально полученных гистограмм, примеры которых приведены на рис. (4, 5, 6). В ходе проведения исследований разработанного метода выделения протяженных объектов использовались следующие значения указанных параметров: $\epsilon_{kr} \geq 0.7$, $q_{kr} \geq 50$.

Проверка принадлежности протяженных изображений объектам внутреннего каталога с соответствующей отбраковкой (отбраковка изображений близких звезд)

На этапе внутрикадровой обработки были выделены протяженные изображения (изображения, предположительно соответствующие изображениям объектов, смазанных собственным движением). Для этого предполагалось, что объект является вытянутым ($\epsilon_{kr} \geq 0.7$) и значение ОСШ $q_{kr} \geq 50$. ОСШ определялась согласно выражения (13), а вытянутость определялась эксцентриситетом (9).

На этапе межкадровой обработки отождествляются кадры серии с формулярами звездного каталога, и формируется внутренний каталог объектов, неподвижных на исследуемой серии кадров.

На базе пикселей отнесенных к протяженным изображениям на этапе внутрикадровой обработки также могут быть сформированы круговые изображения объектов,

которые не смазаны собственным движением. На одном кадре изображения «созвездий» из нескольких звезд, выстроившихся в линию (рис.7а, 7б), ничем не отличаются от изображений объектов, смазанных собственным движением (рис. 7в). По данным круговым изображениям формируется оценка положения предполагаемых объектов [8]. Совокупность всех сформированных на кадре измерений используется для формирования внутреннего каталога объектов, неподвижных на исследуемой серии кадров.

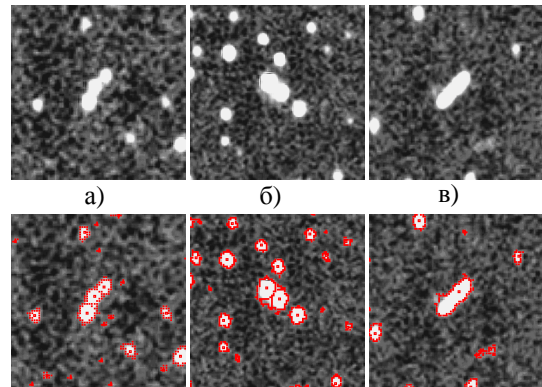


Рис. 7 – Изображение объектов, смазанных собственным движением

После этого из множества протяженных изображений исключаются те, которые включают в себя хотя бы два круговых изображения известных звезд или звезд, попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров. При этом, считается, что j-е протяженное изображение включает в себя круговое изображение l-го объекта внутреннего каталога, объектов, неподвижных на серии кадров, если оценки координат x_l , y_l этого объекта принадлежат области исследуемого j-го протяжённого изображения $x_l \in \Omega_j$, $y_l \in \Omega_j$ (где l и j номера объектов на исследуемом кадре).

МНК-оценка параметров видимого движения объекта вдоль одной координаты

Видимое движение объекта вдоль каждой координаты считается независимым. Следовательно, задачу определения параметров видимого движения объекта вдоль двух координат можно свести к независимому определению параметров видимого движения вдоль каждой координаты.

Для объединения протяженных изображений в серию необходимо пересчитать координаты и ориентацию протяженных изображений с текущих кадров на базовый, кадр, в координатах которого

производятся операции межкадровой обработки. Для этого используются постоянные пластинки, получаемые на этапе отождествления измерений текущего кадра [3].

Совокупность оцениваемых параметров можно представить с помощью вектора оцениваемых параметров:

$$\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y) = (\hat{x}_{0j}, \hat{V}_{xj}, \hat{y}_{0j}, \hat{V}_{yj}). \quad (14)$$

МНК-оценка (14) параметров видимого движения j -го объекта (координата \hat{x}_{0j} на базовом кадре и скорость \hat{V}_{xj}) вдоль координаты x имеет вид [9]:

$$\hat{x}_{0j} = \frac{D \cdot A_x - C \cdot B_x}{T \cdot D - C^2}; \quad (15)$$

$$\hat{V}_{xj} = \frac{T \cdot B_x - C \cdot A_x}{T \cdot D - C^2}, \quad (16)$$

где $A_x = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \hat{x}_{jt}$; $B_x = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \Delta_{gr} \hat{x}_{jt}$; $C = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \Delta_{gr}$; $D = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \Delta_{gr}^2$;

Δ_{gr} – время между текущим и базовым кадрами
 $\Delta_{gr} = (\tau_t - \tau_0)$.

Аналогично, для координаты y :

$$\hat{y}_{0j} = \frac{D \cdot A_y - C \cdot B_y}{T \cdot D - C^2}; \quad (17)$$

$$\hat{V}_{yj} = \frac{T \cdot B_y - C \cdot A_y}{T \cdot D - C^2}, \quad (18)$$

где $A_y = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \hat{y}_{jt}$; $B_y = \sum_{t=1}^{N_{meq}} \Delta_{gr} \hat{y}_{jt}$.

Обнаружение изображений объектов, смазанных собственным движением

После операций внутрикадровой и межкадровой обработки первого и второго этапов метода выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением, остается очень мало изображений, соответствующих истинным и ложным объектам. Это позволяет для указанного выше объединения использовать метод из класса стробовых.

Для реализации стробового метода (рис.8) объединения протяженных изображений в серию следует выполнить следующую последовательность операций.

1. Очередное протяженное изображение текущего кадра проверяется на принадлежность уже сформированным стробам объектов с

большим видимым движением.

1.1 Положения стробов (ожидаемое (экстраполированное) положение объекта) определяются в соответствии с линейной моделью видимого движения объекта:

$$\hat{x}_{et} = \hat{x}_{0j} + \hat{V}_{xj}(\tau - \tau_0); \quad (19)$$

$$\hat{y}_{et} = \hat{y}_{0j} + \hat{V}_{yj}(\tau - \tau_0), \quad (20)$$

где $\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_{xj \max}, \hat{\theta}_{xj \min}, \hat{\theta}_{yj \max}, \hat{\theta}_{yj \min})$ – вектор параметров видимого движения.

Границы стробов определяются выражениями:

$$x_{\min t}^* (\hat{\theta}_{xj \min}) = \hat{x}_{0j} + \hat{V}_{\min xj} \Delta_{gr}; \quad (21)$$

$$x_{\max t}^* (\hat{\theta}_{xj \max}) = \hat{x}_{0j} + \hat{V}_{\max xj} \Delta_{gr}; \quad (22)$$

$$y_{\min t}^* (\hat{\theta}_{yj \min}) = \hat{y}_{0j} + \hat{V}_{\min yj} \Delta_{gr}; \quad (23)$$

$$y_{\max t}^* (\hat{\theta}_{yj \max}) = \hat{y}_{0j} + \hat{V}_{\max yj} \Delta_{gr}. \quad (24)$$

где $\hat{\theta}_{xj \max}$, $\hat{\theta}_{xj \min}$, $\hat{\theta}_{yj \max}$, $\hat{\theta}_{yj \min}$ – векторы параметров видимого движения объекта по каждой координате, соответствующие границам стробов;

$\hat{V}_{\min xj}$, $\hat{V}_{\max xj}$, $\hat{V}_{\min yj}$, $\hat{V}_{\max yj}$ – оценки минимальной и максимальной скорости протяженного объекта по координатам x и y соответственно:

$$\hat{V}_{\min j} = \frac{d_j - 10\sigma_{cont}}{\Delta_\tau}, \quad \hat{V}_{\max j} = \frac{d_j + 10\sigma_{cont}}{\Delta_\tau};$$

σ_{cont} – СКО координат границ изображения (СКО радиуса изображения);

d_j – длина пути (в пикселях), пройденного j -м объектом за время экспозиции, которая также является длиной изображения j -го объекта;

Δ_τ – время экспозиции.

Векторы $\hat{\theta}_{xj \max}$, $\hat{\theta}_{xj \min}$, $\hat{\theta}_{yj \max}$, $\hat{\theta}_{yj \min}$ включают в себя координаты \hat{x}_{jt} , \hat{y}_{jt} положения объекта и его скорости $\hat{V}_{\min xj}$, $\hat{V}_{\max xj}$, $\hat{V}_{\min yj}$, $\hat{V}_{\max yj}$ по каждой координате:

$$\hat{\theta}_{xj \max} = (\hat{x}_0, \hat{V}_{\max xj}); \quad \hat{\theta}_{xj \min} = (\hat{x}_0, \hat{V}_{\min xj}); \quad (25)$$

$$\hat{\theta}_{yj \max} = (\hat{y}_0, \hat{V}_{\max yj}); \quad \hat{\theta}_{yj \min} = (\hat{y}_0, \hat{V}_{\min yj}). \quad (26)$$

1.2. Считается, что изображение протяженного объекта попало в строб, если выполняется условие:

$$\begin{aligned} x_{\min et} < \hat{x}_{jt} < x_{\max et}; \\ y_{\min et} < \hat{y}_{jt} < y_{\max et}. \end{aligned} \quad (27)$$

1.3. Если данное изображение попадает в один из указанных стробов, параметры строба уточняются в соответствии с параметрами очередного протяженного изображения попавшего в строб согласно выражений (15)÷(17).

2. Для каждого изолированного протяженного изображения (протяженного изображения, не попавшего в стробы объектов с большим видимым движением, не включенного в серию протяженных изображений) формируется новый строб (рис. 8). Положение и ориентация строба определяется углом изображения и вытянутостью протяженного изображения. Для этого используются выражения (19), (20). Размеры строба определяются показателями качества работы процедуры оконтуривания изображения, показателями точности оценки параметров протяженного изображения и пересчета координат и ориентации протяженных изображений с текущих кадров на базовый.

3. Объектов с большим видимым движением считается обнаруженным (серия протяженных изображений одного объекта с большим видимым движением считается сформированной) если на N_{fr} кадрах в соответствующий строб попало m измерений, соответствующих протяженным изображениям объекта.

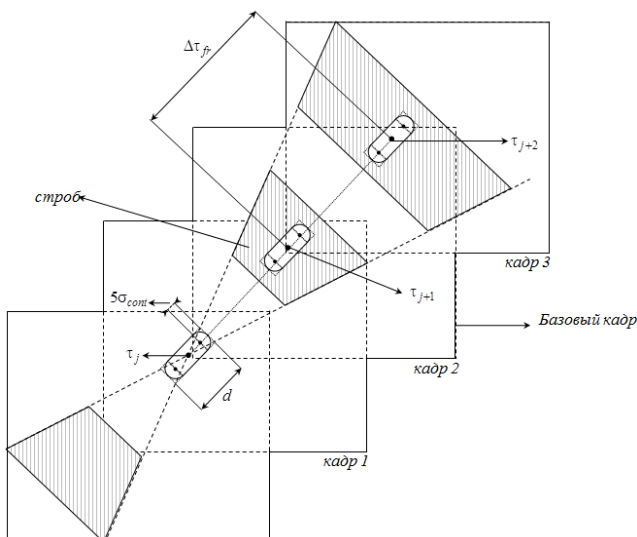


Рис. 8 – Серия кадров с протяженным изображением объекта

Вычислительный метод выделения (обнаружения) изображения небесных объектов, смазанных собственным движением

1) На первом этапе (соответствует внутрикадровой обработке) из множества изображений объектов на кадре выбираются те изображения, которые соответствуют селективным признакам протяженных изображений ($\epsilon_{kr} \geq 0.7$, $q_{kr} \geq 50$) (11),(12).

2) Исключение из множества протяженных измерений исследуемого кадра измерений соответствующих изображениям известных объектов (звезд) или звезд попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров.

3) Протяженные изображения (по одному на каждом кадре) объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта

3.1 Проверка протяженных изображений текущего кадра на принадлежность уже сформированным стробам объектов с большим видимым движением (27). В случае попадания очередного изображения в один из указанных стробов – с использованием метода наименьших квадратов уточняются, согласно выражений (15) ÷ (17), параметры данного строба в соответствии с параметрами протяженного изображения попавшего в строб.

3.2 Для каждого изолированного протяженного изображения (не попавшего в уже существующие стробы объектов с большим видимым движением) формируется новый строб с параметрами (положением и размерами), определяемыми согласно выражений (19) ÷ (24).

3.3 Объект с большим видимым движением считается обнаруженным, если на N_{fr} кадрах в соответствующий строб попало m измерений, соответствующих протяженным изображениям.

Анализ показателей качества предложенного метода выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением

В таблице 2 представлены результаты обработки 8 кадров размера 3056x3056 пикселей. В среднем на каждом кадре было сформировано около 42 тысяч измерений. После первого этапа (таблица 2) предложенного в работе метода (выполняется при внутрикадровой обработке) из 42 тысяч измерений остается около 3,5 % измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. После исключения объектов внутреннего каталога из всего количества измерений кадра остается только 1% измерений, которые гипотетически

могут соответствовать протяженным изображениям.

Событие, заключающееся в ошибочном выделении объектов с большим видимым движением при исследованиях происходило не чаще чем 1 раз на несколько кадров. В этой связи количество исследуемых ошибочных выделений после 3 этапа метода выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением, в таблице 2 не приведено.

Таблица 2. – Пример распределения протяженных измерений на серии кадров до и после формирования внутреннего каталога (БК)

№ кадра (размер)	Всего протяженных измерений на кадре	Протяженных измерений после 1 этапа метода	%	Протяженных измерений после 2 этапа метода	%
1 (3056x3056)	40852	1178	2,9%	339	0,8%
2 (3056x3056)	41458	1124	2,7%	375	0,9%
3 (3056x3056)	42805	1074	2,5%	340	0,8%
4 (3056x3056)	41732	1263	3,0%	340	0,8%
5 (3056x3056)	43211	2104	4,8%	554	1,2%
6 (3056x3056)	43259	1865	4,3%	461	1,0%
7 (3056x3056)	43818	1638	3,7%	314	0,7%
8 (3056x3056)	43691	1702	3,9%	443	1,0%

Выводы

Разработан метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением. Данный метод состоит из трех этапов.

1) На первом этапе (выполняется при внутрикадровой обработке серии кадров) из множества изображений объектов на кадре выбираются те, которые соответствуют селективным признакам протяженных изображений (11), (12).

2) Исключение из множества протяженных измерений исследуемой серии кадров измерений, соответствующих изображениям известных объектов (звезд) или звезд попавших в сформированный внутренний каталог объектов, неподвижных на серии кадров.

3) Протяженные изображения (по одному на каждом кадре) объединяются в серию протяженных изображений одного гипотетического объекта.

3.1 Проверка протяженных изображений текущего кадра на принадлежность уже сформированным стробам объектов с большим видимым движением (27). В случае попадания очередного изображения в один из указанных стробов – с использованием метода наименьших квадратов уточняются, согласно выражений $(15) \div (17)$, параметры данного строба в соответствии с параметрами протяженного изображения попавшего в строб.

3.2 Для каждого изолированного протяженного изображения (не попавшего в уже существующие стробы объектов с большим видимым движением) формируется новый строб с параметрами (положением и размерами), определяемыми согласно выражений $(19) \div (24)$.

3.3 Объект с большим видимым движением считается обнаруженным, если на N_{fr} кадрах в соответствующий строб попало m измерений, соответствующих протяженным изображениям.

На первом этапе выделяются протяженные изображения. На втором этапе исключаются случайным образом образованные кластеры объектов с круговыми изображениями. Третий этап предназначен для проверки согласованности между собой оценок положения и скорости, соответствующих изображениям гипотетически одного и того же объекта на разных кадрах исследуемой серии.

Предложенный метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением, реализован в программе автоматического поиска астероидов на серии ПЗС-кадров CoLiTec [9, 10, 11]. Исследования проходили на восьми, предварительно обработанных программой CoLiTec, кадрах размера 3056x3056 пикселей. В среднем на каждом кадре было сформировано около 42 тысяч измерений. После первого этапа (таблица 2) предложенного в работе метода из 42 тысяч измерений остается около 3,5 % измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. После исключения объектов внутреннего каталога из всего количества измерений кадра остается только 1% измерений, которые гипотетически могут соответствовать протяженным изображениям. После использования 3 этапа метода ложных обнаружений объектов с высокой скоростью видимого движения при экспериментальных исследованиях найдено не было.

Разработанный метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением, может быть использован в различных программных комплексах обработки цифровых изображений для выделения (обнаружения) небесных протяженных объектов, например в программах автоматизированного

обнаружения малых тел Солнечной системы (астероидов и комет) на серии цифровых кадров.

Список литературы

- 1 **George, E. Smith** The invention and early history of the CCD [Text] / **E. Smith George** // *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – V. 3, № 82. – P. 2307-2312.
- 2 **Kouprianov, V.** Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects / **V. Kouprianov** // *Advances in Space Research.* – 2008. – Т. 41(7). – С. 1029-1038.
- 3 **Bauer, T.** Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images / **T. Bauer** // *Proceedings of the IADIS Multiconference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal.* – June 20-22 2009. – P. 3-15.
- 4 **Zhai, C.** et al. Detection of a Faint Fast-moving Near-Earth Asteroid Using the Synthetic Tracking Technique // *The Astrophysical Journal.* – 2014. – Т. 792. – №. 1. – 60 с.
- 5 **Vereš, P.** et al. Improved asteroid astrometry and photometry with trail fitting // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* – 2012. – Т. 124. – №. 921. – С. 1197-1207.
- 6 **Безкровный, М. М.** Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции / **М. М. Безкровный, А. М. Кожухов, В. Е. Саваневич, А. Б. Анненков, Н. С. Соковикова** // *Система обробки інформації: Зб. наук. пр.* – Харків: ХУПС – 2012. – Вып. 7(105). – С. 44 - 50.
- 7 **Яне, Б.** Цифровая обработка изображений / Б. Яне пер. с англ. - М: Техносфера, 2005. – 584с
- 8 **Саваневич, В. Е.** Оценка координат астероида на дискрет-ном изображении / **В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков** // *Радиотехника.* –2010. – Вып. 162. – С. 78-86.
- 9 **Savanevych, V. E.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / **V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskiy, N. Sokovikova** // *MNRAS.* – 2015. – Т. 451 (3). – С. 3287-3298.
- 10 **Vavilova, I. B.** UkrVO Joint Digitized Archive and Scientific Prospects / **I. B. Vavilova, L. K. Pakuliak, Yu. I. Protsyuk,** et al. // *Baltic Astronomy.* – 2012. – vol. 21. – P. 356-365.
- 11 Свід. про реєстр. авт. права № 47290. Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет на серії ПЗС-кадрів CoLiTeс» / **В. Є. Саваневич, О. Б. Брюховецький, О.М. Кожухов, Є.М. Діков, В.П. Власенко, Л.В. Єленін, М.М. Безкровний, О.Б. Анненков, О.В. Герасименко** — прийнято 21. 01. 13.

Bibliography (transliterated)

- 1 **George, E. Smith** The invention and early history of the CCD [Text] / *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – V. 3, № 82. – P. 2307-2312.
- 2 **Kouprianov, V.** Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects / *Advances in Space Research.* – 2008. – Т. 41(7). – С. 1029-1038.
- 3 **Bauer, T.** Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images / *Proceedings of the IADIS Multiconference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal.* – June 20-22 2009. – P. 3-15.
- 4 **Zhai C.** et al. Detection of a Faint Fast-moving Near-Earth Asteroid Using the Synthetic Tracking Technique / *The Astrophysical Journal.* – 2014. – Т. 792. – №. 1. – 60 p.
- 5 **Vereš P.** et al. Improved asteroid astrometry and photometry with trail fitting / *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* – 2012. – Т. 124. – №. 921. – P. 1197-1207.
- 6 **Bezkrorny, M. M., Kozhukhov, A. M., Savanevich, V. E., Annenkov, A. B., Sokovikova, N. S.** Otsenka mestopolozheniya ob'ekta na PZS-kadre pri srednem vremeni ekspozitsii / *Sistemi obrobki informatsii: Zb. nauk. pr.* – Kharkiv: KhUPS – 2012. – Vyp. 7(105). – S. 44 - 50.
- 7 **Yane, B.** Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy / B. Yane per. s angl. - M: Tekhnosfera, 2005. – 584s.
- 8 **Savanevich, V. E., Bryukhovetskiy, A. B., Kozhukhov, A. M., Dikov, E. N.** Otsenka koordinat asteroida na diskret-nom izobrazhenii / *Radiotekhnika.* – 2010. – Vyp. 162. – S. 78-86.
- 9 **Savanevych, V. E., Briukhovetskiy, O. B., Sokovikova, N.,** et al. A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / *MNRAS.* – 2015. – Т. 451 (3). – P. 3287-3298.
- 10 **Vavilova, I. B., Pakuliak, L. K., Protsyuk, Yu. I.,** et al. UkrVO Joint Digitized Archive and Scientific Prospects / *Baltic Astronomy.* – 2012. – vol. 21. – P. 356–365.
- 11 Svid. pro reestr. avt. prava № 47290. Ukraïna. Komp'yuterna programa «Programa avtomatizovanogo vidkrittya asteroidiv ta komet na serii PZS-kadriv CoLiTeс» / **V. E. Savanevich, O. B. Briukhovetskiy, O. M. Kozhukhov, E. M. Dikov, V. P. Vlasenko, L. V. Elenin, M. M. Bezkrorny, O. B. Annenkov, O. V. Gerasimenko** — priynyato 21. 01. 13.

Поступила (received) 20.06.2015

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

УДК 664:637.055

**МОНІТОРИНГ ІНФОРМАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ
ПРОБІОТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ *LACTOBACILLUS ACIDOPHILUS*
У СКЛАДІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ****В. Л. БОЛЬШАКОВА**

Відділ з організаційних питань, інформації та зовнішніх стосунків Державного підприємства «Дніпростандартметрологія», Дніпропетровськ, УКРАЇНА
email: betavl@rambler.ru

АНОТАЦІЯ Проаналізовано існуючі технології харчових та фармацевтичних продуктів на основі ацидофільної палички. Особливу увагу приділено виду пробіотичних мікроорганізмів *Lactobacillus acidophilus* (LA 5) та продуктів на його основі. Обґрунтовано ідею щодо використання капсульованих форм ацидофільної палички, як засобу пролонгації терміну зберігання продуктів без втрати їх пробіотичних властивостей та технологічної безпеки. Наведено прогнозовані можливості розширення асортименту харчових продуктів з ацидофільною паличкою.

Ключові слова: капсульовані пробіотичні мікроорганізми, ацидофільна паличка, функціональні продукти, альгінатні оболонки

АННОТАЦИЯ Проанализированы существующие технологии пищевых и фармацевтических продуктов на основе ацидофильной палочки. Особенное внимание уделено виду пробиотических микроорганизмов *Lactobacillus acidophilus* (LA 5) и продуктов на его основе. Обоснована идея использования капсулированных форм ацидофильной палочки, как средства пролонгации срока хранения продуктов без потери их пробиотических свойств и технологической безопасности. Приведены прогнозируемые возможности расширения ассортимента пищевых продуктов с ацидофильной палочкой.

Ключевые слова: капсулированные пробиотические микроорганизмы, ацидофильная палочка, функциональные продукты, альгинатные оболочки

**MONITORING OF PROBIOTIC SYSTEMS USING BASED ON LACTOBACILLUS
ACIDOPHILUS IN THE FOOD****V. BOL'SHAKOVA**

Department of organizational issues, information and external relations of the State enterprise "Dniprostandartmetrology",
Dnipropetrovs'k, UKRAINE

ABSTRACT The article is devoted to a detailed analysis of existing technologies of food and pharmaceutical products based on *Lactobacillus acidophilus*. Particular attention is given to mean the probiotic microorganism *Lactobacillus acidophilus* (LA 5) and products based on it.

In this article, the emphasis is put on the fact that *Lactobacillus acidophilus* is extensively metabolized in nearly all food environments, while products of metabolism inhibit prolonged preservation of high consumer properties of goods. According to the results of the monitoring of existing information, identified problems are little understood and requires further research.

The article explains the idea of using encapsulated *Lactobacillus acidophilus* forms as a means of prolonging the shelf life of products without losing their probiotic properties and process safety.

Monitoring results can be the basis for technology products containing *Lactobacillus acidophilus* capsule forms that will greatly expand the range of goods with probiotic properties of this type of microorganisms.

The article summarizes the new material on the subject in question, introduced into scientific use the term "encapsulated form of *Lactobacillus acidophilus*", "encapsulation of *Lactobacillus acidophilus*".

The article analyzes the market of food and pharmaceutical products based acidophilic bacillus. Scientifically grounded new approach to increase the shelf life of such products by means of inclusion of probiotic microorganisms in resistant to acids membranes based on sodium alginate. Also in the article presented the possibility of expanding the range of projected food with *acidophilus* bacillus.

Keywords: encapsulated probiotic microorganisms, *acidophilus* bacillus, functional products, alginate shells.

Вступ

Асортимент харчових продуктів, які мають корисний вплив на організм людини, невтримно

зростає. На сьогодні, метою майже усіх науковців і виробників, що працюють у галузі харчових технологій, є створення функціональних або поліфункціональних продуктів, які мають конкуруючі

переваги один перед одним і перед споживачем. Одні пропозиції поповнюють організм людини мікронутрієнтами, інші, – покращують травлення, користь третіх полягає у позитивному впливі на серцево-судинну, нервову системи тощо. Проте й досі існує прогалина в асортименті продуктів, які відновлюють мікрофлору кишечника.

Нормальна мікрофлора кишечника створює належні умови для функціонування та розвитку організму: забезпечує колонізаційну резистентність шлунково-кишкового тракту до патогенних мікроорганізмів, покращує, а у критичних випадках і відновлює захисну функцію імунної системи; сприяє засвоєнню поживних речовин і мікронутрієнтів [1]. Важливу роль у формуванні корисних властивостей як мікрофлори кишечника, так і травного каналу у цілому, відведено пробіотичним мікроорганізмам, що належать до виду *Lactobacillus acidophilus*. Вагомий позитивний вплив цього виду мікроорганізмів полягає у продукуванні антибіотичних речовин, які здатні знешкодити збудників хвороб та нейтралізувати активність шкідливих бактерій в організмі людини [2].

Мета роботи

Особливо актуальним залишається питання термінів придатності харчових продуктів із вмістом ацидофільної палички, оскільки даному типу мікроорганізмів притаманна підвищена метаболічна активність у харчовому поживному середовищі, яким є молоко та молочні продукти. Тому метою статті стало вивчення існуючої інформації з приводу окресленого питання, що дозволить розробити стратегічний план створення технологій харчових ацидофільних продуктів з пролонгованою корисною дією для людини.

Викладення основного матеріалу

Перші миті життя людини стають поштовхом для зародження його мікрофлори, яка повинна активно виконувати захисну функцію увесь час існування організму. Молочнокислі бактерії виду *Lactobacillus acidophilus* (ацидофільна паличка) відіграють роль антисептиків, оскільки упродовж свого життєвого циклу, виробляють антибіотичні речовини: низин, лізин, лакталін, нікозин, які пригнічують запальні процеси, запобігають процесам гниття у всіх відділах шлунково-кишкового тракту [3].

На відміну від інших пробіотичних організмів мікробного походження (болгарської палички, біфідобактерій тощо), ацидофільна паличка не відразу руйнується шлунковим соком, що дозволяє їй природним шляхом виробити антибіотичні речовини.

Продукти на основі *L. acidophilus* дуже корисні дітям від самого народження, жінкам «при надії»,

хворим під час реабілітації, літнім людям і тим, хто обирає шлях здорового життя.

За загальними даними моніторингу інформації стало відомо, що найбільш оптимальним середовищем для прояву біологічної активності ацидофільної палички є молоко та продукти його переробки. В результаті метаболічних процесів утворюється молочна кислота, яка знижує рівень рН до критичних значень, що призводить до масової загибелі пробіотичних мікроорганізмів у середині продукту. Такі процеси протікають дуже швидко – упродовж 72 годин, – після чого продукт стає зовсім непридатним для споживання. Це і стає основною умовою економічної непривабливості продуктів даного виду. Звідси випливає, що пошук компромісу є необхідним.

Автори [4] пропонують для підвищення якості готового виробу спосіб отримання білкового кисломолочного продукту, що ґрунтується на приготуванні молочної суміші із подальшими пастеризацією та охолодженням до температури заквашування, внесення закваски молочнокислих мікроорганізмів і біфідобактерій, ацидофільної палички, лактококків та лейконостоків у співвідношенні 8:0,1:0,5:1,4.

Нажаль, автори не уточнюють дані щодо термінів придатності виробу і недостатньо повно описують параметри технологічного процесу.

Розробники [5, 6] вважають доцільним впровадження способу виробництва морозива ацидофільного та сметани для дитячого харчування, що мають підвищену біологічну цінність. Спосіб виробництва морозива включає приготування суміші, її фільтрацію, пастеризацію, охолодження, заквашування закваскою ацидофільної палички у кількості 5 %, сквашування тривалістю 3...5 год, охолодження, заморожування, фасування, загартування, пакування та зберігання морозива протягом 6...8 місяців при температурі мінус 18±2 °С. Щодо способу виробництва сметани, слід описати деякі зміни класичної технології, які полягають у попередньому внесенні легкоплавкої фракції молочного жиру (28...30%) та додаванні у закваску з ацидофільною паличкою біфідобактерій у співвідношенні 0,5:10.

Дані розробки, прогнозовано, мають підвищену біологічну цінність, безумовно наділені пробіотичними властивостями, проте з опису [5] не досить зрозумілим залишається склад поживного середовища, відсутній опис органолептичних показників морозива на основі закваски, а з опису сметани для дитячого харчування недостатньо обґрунтованою залишається кількість внесення колонієутворюючих одиниць біфідобактерій, оскільки у кислому середовищі вони гинуть і на момент споживання можуть не відповідати заявленій кількості.

Однією з найбільш виправданих у лікувально-профілактичному сенсі розробок стало виробництво сухого вуглеводного продукту «Лактовіт» [7], який містить ацидофільну паличку у композиції з біологічно активними та високоадгезивними штаммами лактококків видів *Streptococcus thermophilus*, *Lactococcus lactis ssp. lactis* або ентерококка *Enterococcus faecium*. Проте слід зауважити, що високий вміст цукрів у даній розробці (близько 72%) призводить до ряду обмежень у її споживанні. Також дана розробка належить до розряду фармацевтичних продуктів.

Дослідницька група Омського аграрного університету ім. П.О. Столипіна запропонувала декілька способів одержання композиційних кисломолочних продуктів [8-12]. А саме, симбіотичний кисломолочний продукт [8], який містить соєве молоко, отримане методом екстрагування водорозчинних речовин з підготованого та подрібненого сухого насіння сої, з подальшим розділенням центробіжним способом суспензії та стерилізацією соєвого молока. Підготовлене соєве молоко пропонують розводити у коров'ячому, вносити смакорегулюючі компоненти (цукор, сіль, сухе знежирене молоко), пастеризувати, гомогенізувати, охолоджувати, заквашувати бактеріальною композицією на основі *Lactobacillus acidophilus* БЗ-АВ та кефірних грибків. Врешті отримують продукт з підвищеними органолептичними, мікробіологічними, структурно-механічними показниками та високою харчовою і біологічною цінністю. Слід дещо зауважити про можливість вмісту у соєвому молоці генетично-модифікованих мікроорганізмів.

За даними описів способів одержання сирного продукту «Умнік» [9], кисломолочного пастоподібного продукту [10] і композиції для отримання молочно-білкового біококтейля [11] стало відомо, що саме участь інших пробіотичних мікроорганізмів – термофільного стрептокока, біфідо- та лактобактерій сприяють максимальному прояву корисних властивостей ацидофільної палички. Також слід зауважити, що вітамінно-мінеральні премікси, ферментні препарати [9], фруктові соки та наповнювачі [11] і навіть бджолина обножка [12] також добре поєднуються з мікроорганізмами у складі продуктів. Доповнення такими компонентами збільшує біологічну цінність та покращує органолептичні показники продуктів із вмістом ацидофільної палички.

Позитивний ефект від використання пробіотичних композицій на основі ацидофільної палички описані і в роботах [13-15]. Автори [13] описують високі органолептичні показники йогурту, виготовленого на основі *Lactobacillus casei*. У роботах [14, 15] детально описуються результати досліджень з розробки технології десертів: вегетаріанського на основі ацидофільної палички та соєвого молока [14] і

замороженого десерту на основі суміші пробіотичних мікроорганізмів [15].

Згідно проаналізованої інформації також відзначається присутність загущувачів желатину, пектину, крохмалю [10], які, крім того, покращують і стабілізують консистенцію готового продукту.

Обговорення результатів

Результати моніторингу інформації про участь пробіотичних мікроорганізмів виду *Lactobacillus acidophilus* у харчових системах дозволили визначити основні критерії збереження найвищих показників якості таких продуктів та сформувавши уяву про технологічний процес виробництва продуктів із пролонгованими термінами зберігання (рис. 1).

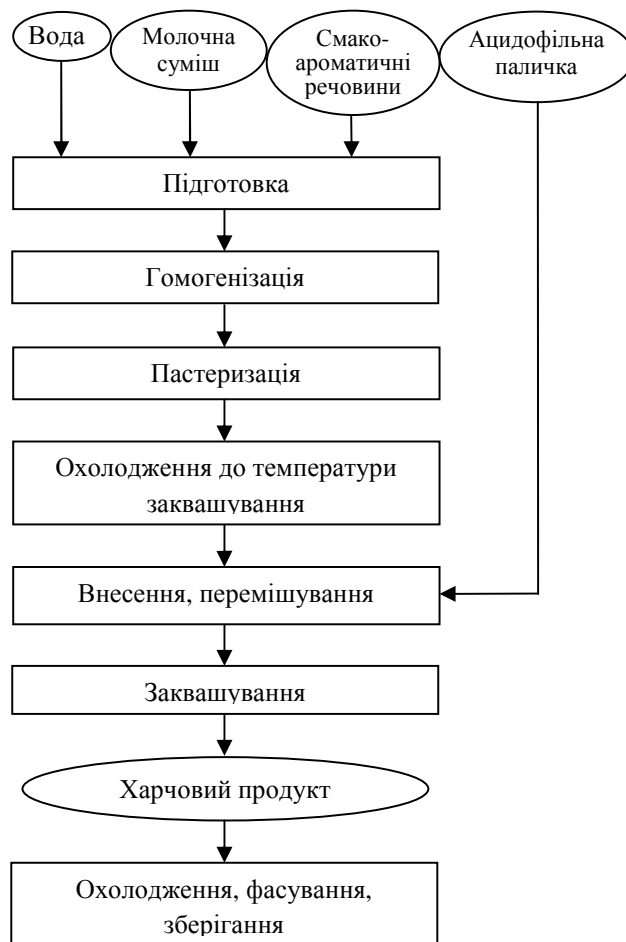


Рис. 1 – Принципова технологічна схема виробництва продуктів із пролонгованими термінами зберігання

Пролонгація термінів забезпечується за рахунок пастеризації. Проте, з наведеної інформації про продукти, строки й досі залишаються небажано короткими.

У наведеній схемі складова «Молочна суміш» може бути створеною як на основі незбираного

молока, так і на основі продуктів його переробки. Проте слід зазначити, що у даних сумішах міститься значна кількість живильних речовин для ацидофільної палички, що сприятиме збільшенню її колоній і, врешті, збільшенню кислотності, що негативно впливає на показники якості продукту і зменшує термін його придатності.

Таким чином, для вирішення основної проблеми зберігання продуктів на основі ацидофільної палички пропонується використати такі технологічні прийоми, за яких рух мікроорганізмів був би обмеженим, а кількість субстрату достатньою для існування у стані анабіозу. Вирішення цього питання полягає у застосуванні нового технологічного рішення – капсулювання.

Зарубіжні вчені [16, 17] науково-обґрунтували доцільність впровадження мікрокапсулювання під час розробки технологій продуктів з ацидофільною паличкою. Так, у роботі [16] описано принцип виробництва твердого сиру з внесенням ацидофільної палички, що пройшла стадію мікрокапсулювання у оболонки з альгінату кальцію. Результати, обговорені у роботі [17], свідчать про доцільність мікроінкапсуляції пробіотичних культур задля збереження їх титру у готових продуктах строком до 28 дб.

Як бачимо, уміщення пробіотичних мікроорганізмів у оболонки на основі солей альгінату має дієвий вплив на пролонгацію термінів зберігання продуктів на основі ацидофільної палички, проте результатом вищезначених розробок є культури мікроорганізмів або їх композицій вкритих оболонкою у сухому стані. Звідси виникає питання про вірогідність повноти переходу мікроорганізмів з іммобілізаційного стану до активного в умовах шлунково-кишкового тракту та можливість створення середовища для колонізації палички в місцях її природного існування.

Вітчизняні вчені Пивоваров Є. П., Кондратюк Н.В. та ін. [18] довели, що, у разі заміни стадії мікрокапсулювання на процес капсулювання, в результаті якого уміщуються в оболонку активовані мікроорганізми, можна досягти максимального пробіотичного ефекту. Розробниками способу доведено, що окрім збереження титру, капсулювання впливає на пролонгацію термінів зберігання продуктів до 4 місяців за умов 4...6 °С.

Висновки

Таким чином, результати моніторингу інформації щодо використання ацидофільної палички у складі харчових продуктів дозволяють розробити стратегічний план впровадження інновації, яка ґрунтується на принципах капсулювання попередньо активованих мікроорганізмів даного виду у капсулу з альгінату натрію разом із середовищем для існування.

Список літератури

- 1 **Пивоваров, Є. П.** Перспективи використання капсульних структурованих продуктів у харчуванні / **Є. П. Пивоваров, Н. В. Кондратюк** // *Наук. праці Одеської націон. академії харчових технологій : зб. наук. пр.* – Одеса : ОНАХТ. – 2009. – №. 36. – Т. 2. – С. 194-199.
- 2 **Большакова, В. Л.** Вдосконалення технології ацидофільних продуктів засобом капсулювання / **В. Л. Большакова, Н. В. Кондратюк, П. П. Пивоваров, Є. П. Пивоваров** // *Міжн. наук.-техн. конф. «Новітні науково-технічні рішення в харчовій промисловості».* – Львів: СПОЛОМ. – 2015. – Р. 23-49.
- 3 **Кондратюк, Н. В.** Розробка та вивчення харчових систем на основі *Lactobacillus acidophilus* / **Н. В. Кондратюк, В. Л. Большакова, А. В. Кутня** // *Міжн. наук.-практ. конф. «Актуальні проблеми та перспективи розвитку харчових виробництв, готельно-ресторанного та туристичного бізнесу».* – Полтава: ВНЗ Укоопспілки «ПУЕТ». – 2014. – С. 34-36.
- 4 **Пат. 2222953** **Российская Федерация, МПК A23C9/12, A23C23/00** Способ производства белково-кисломолочного продукта / В. А. Грунская, Г. В. Борисова, Н. М. Филиппова, Н. М. Парменова; Заявит. ГОУ Вологодская государственная молочногохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина. - № 2002101991/13; заявл. 20.09.03; опубл. 10.02.04, Бюл. № 3.
- 5 **Пат. 27650** **України, МПК A23G 9/04** Спосіб виробництва морозива ацидофільного з підвищеною біологічною цінністю / Л. М. Хомічак, Г. Є. Поліщук, Г. П. Калініна, М. М. Антонюк, А. В. Згурський; Заявит. НУХТ. - № 200707139; заявл. 25.06.07; опубл. 12.11.07, Бюл. № 18.
- 6 **Пат. SU1200875** **А, МПК A23C13/6** Способ производства сметаны для детского питания / А. Д. Грищенко, Л. К. Забанова, А. В. Романова, И. С. Хамагаева; Заявит. Восточно-Сибирский технологический институт. - № 3611670; заявл. 25.02.85; опубл. 30.12.85, Бюл. № 48.
- 7 **Пат. 22774** **України, МПК A61K35/66, A61K47/26** Сухий вуглеводний продукт лікувально-профілактичної дії «Лактовіт» / С. С. Гуляев-Зайцев, Н. Г. Макосій, Н. Ф. Кігель, Г. К. Тарадій, Г. О. Єресько; Заявит. Технологічний інститут молока та м'яса УААН. - № 199806124; заявл. 10.06.96; опубл. 21.04.98, Бюл. № 3.
- 8 **Пат. 2451451** **Российская Федерация, МПК A23C9/12, A23C9/127** Способ получения симбиотического кисломолочного продукта / Т. М. Давыдова, П. А. Лисин; Заявит. Омский аграрный университет им. П. А. Столыпина. - № 2010124435/10 ; заявл. 15.07.10; опубл. 20.12.11, Бюл. № 15.
- 9 **Пат. 2465775** **Российская Федерация, МПК A23C19/055** Способ получения сырного продукта «Умник» / Е. В. Сорокина, Н. Б. Гаврилова, Е. А. Молибога; Заявит. Омский аграрный университет им. П. А. Столыпина. - № 2011114310/10 ; заявл. 12.04.11; опубл. 10.11.12, Бюл. № 31.
- 10 **Пат. 2376779** **Российская Федерация, МПК A23C23/00** Способ производства кисломолочного пастообразного продукта / Н. Б. Гаврилова, О. В. Пасько, О. А. Гладилова; Заявит. Омский аграрный университет им. П. А. Столыпина. - № 2008106343/13 ; заявл. 18.02.08; опубл. 27.12.09, Бюл. № 36.

- 11 Пат. 2379904 Российская Федерация, МПК А23С23/00 Композиция для получения молочно-белкового биокоттеджа / С. А. Хитрик, Н. Б. Гаврилова, О. В. Пасько; Заявит. Омский аграрный университет им. П. А. Столыпина. - № 2008114558/13 ; заявл. 14.04.08; опубл: 27.01.10, Бюл. № 3.
- 12 Бывайлова, Е. А. Разработка технологии обогащенного ацидофильного продукта с повышенной биологической ценностью и пребиотическими свойствами / Е. А. Бывайлова // автореф. дисс. канд. техн. наук. – Ставрополь: ДонГАУ. – 2014. – 30 с.
- 13 Kayanush, J. A. Quality attributes of yogurt with *Lactobacillus casei* and various prebiotics / J. A. Kayanush, P. McGrew // *LWT - Food Science and Technology*. – 2007. – V. 40, №10. – P. 1808-1814.
- 14 Heenan, C. N. Survival and sensory acceptability of probiotic microorganisms in a nonfermented frozen vegetarian dessert / C. N. Heenan, M. C. Adams, R. W. Hosken, G. H. Fleet // *LWT - Food Science and Technology*. – 2004. – V. 37, № 4. – P. 461-466.
- 15 Hong, S. H. Natural Exopolysaccharides Enhance Survival of Lactic Acid Bacteria in Frozen Dairy Desserts / S. H. Hong, R. T. Marshall // *Journal of Dairy Science*. – 2001. – V. 84, № 6. – P. 1367-1374.
- 16 Mirzaei, H. Effect of calcium alginate and resistant starch microencapsulation on the survival rate of *Lactobacillus acidophilus* La5 and sensory properties in Iranian white brined cheese / H. Mirzaei, H. Pourjafar, A. Homayouni // *Food Chemistry*. – 2012. – V. 132, № 4. – P. 1966-1970.
- 17 Souza, C. H. Viability of *Lactobacillus acidophilus* La-5 added solely or in co-culture with a yoghurt starter culture and implications on physico-chemical and related properties of Minas fresh cheese during storage / C. H. Souza, S. M. Saad // *LWT - Food Science and Technology*. – 2009. – V. 42, № 2. – P. 633-640.
- 18 Кондратюк, Н. В. Технологічні аспекти підвищення біодоступності препаратів, що містять біфідобактерій / Н. В. Кондратюк, Є. П. Пивоваров, С. К. Воцелко, О. П. Неклеса, О. О. Гринченко // *Мікробіологічний журнал (НАН України)*. – 2014. – С. 124-130.
- scientific-practical conference "Actual problems and prospects of food production, hotel and restaurant and tourism business". Poltava: Publishing house VNZ Ukoopspilky «PUET». – 2014. – P. 34-36.
- 4 Grunskaya, V. A., Borisova, G. V., Filippova, N. M., Parmenova, N. M. 2004. Rus. Patent № 2222953
- 5 Homichak, L. M., Polishchuk, G. Y., Kalinina, G. P., Antonjuk, M. M., Zgurs'kiy, A. V. 2007. Ukr Patent № 27650
- 6 Gryshchenko, A. D., Zabanova, L. K., Romanova, A. V., Hamagayeva, I. S. 1985. SU Patent № 1200875
- 7 Gulyayev-Zaitcev, S. S., Makosiy, N. G., Kigel', N. F., Taradij, G. O. 1998. Ukr Patent № 22774
- 8 Davydova, T. M., Lisin, P. A. 2011, Rus. Patent № 2451451
- 9 Sorokina, E. V., Gavrylova, N. B., Moliboga, E. A. 2011, Rus. Patent №2465775
- 10 Gavrilo, N. B., Pas'ko, O. V., Gladilova, O. A. 2009, Rus. Patent №2376779.
- 11 Hitrik, S. A., Gavrilo, N. B., Pas'ko, O. V. 2010, Rus. Patent № 2379904.
- 12 Byvailova, E. A. Development of rich products technology with high biological value and prebiotic properties / E. A. Byvailova. – Stavropol': DonGAU. – 2014. – 30 s.
- 13 Kayanush, J. A., McGrew, P. Quality attributes of yogurt with *Lactobacillus casei* and various prebiotics / *LWT - Food Science and Technology*. – 2007. – № 40(10). – P. 1808-1814.
- 14 Heenan, C. N., Adams, M. C., Hosken, R. W., Fleet, G. H. Survival and sensory acceptability of probiotic microorganisms in a nonfermented frozen vegetarian dessert / *LWT - Food Science and Technology*. – 2004, – № 37(4). – P. 461-466.
- 15 Hong, S. H., Marshall, R. T. Natural Exopolysaccharides Enhance Survival of Lactic Acid Bacteria in Frozen Dairy Desserts / *Journal of Dairy Science*. – 2001. – № 84(6). – P. 1367-1374.
- 16 Mirzaei, H., Pourjafar, H., Homayouni, A. Effect of calcium alginate and resistant starch microencapsulation on the survival rate of *Lactobacillus acidophilus* La5 and sensory properties in Iranian white brined cheese / *Food Chemistry*. – 2012. – № 132(4). – P. 1966-1970.
- 17 Souza, C. H., Saad, S. M. Viability of *Lactobacillus acidophilus* La-5 added solely or in co-culture with a yoghurt starter culture and implications on physico-chemical and related properties of Minas fresh cheese during storage / *LWT - Food Science and Technology*. – 2009. – № 42 (2). – P. 633-640.
- 18 Kondratjuk, N. V., Pyvovarov, Y. P., Vocelko, S. K., Neklesa, O. P. Technological aspects of improving the bioavailability of drugs containing bifidobacteria / *Microbiological magazine*. – 2014. – P. 124 - 130.

Bibliography (transliterated)

- 1 Pyvovarov, Y. P. Prospects of capsulated structured products using in the nutrition. *Proceedings of Odessa National Academy of Food Technologies: scientific research journal*. Odessa : Publishing house ONAFT. – 2009. – № 36(2). – P. 194-199.
- 2 Bol'shakova, V. L. Improving technology means encapsulation acidophilus products. *International Scientific Conference "New scientific and technical solutions in the food industry"* – Lviv: SPOLOM. – 2015. – P. 23-49.
- 3 Kondratjuk, N. V. Development and studying of food systems based on *Lactobacillus acidophilus* / *International*

Надійшла (received) 30.05.2015

УДК 541.128.13

АЛЬДОЛЬНА КОНДЕНСАЦІЯ МЕТИЛПРОПІОНАТУ З ФОРМАЛЬДЕГІДОМ НА B_2O_3 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2 КАТАЛІЗАТОРАХ**Ю. В. ДМИТРУК^{1*}, Р. В. НЕБЕСНИЙ¹, В. В. ІВАСІВ¹, О. О. МАЦЬКІВ²**¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА²Львівський інститут економіки та туризму, Львів, УКРАЇНА*email: yulia.nu.lp@gmail.com

АНОТАЦІЯ Стаття присвячена дослідженню процесу одержання метилметакрилату альдольною конденсацією метилпропіонату з формальдегідом у газовій фазі у присутності каталізаторів на основі оксидів бору та фосфору, промотованих оксидом вольфраму. Визначено вплив вмісту WO_3 в каталізаторі та температури здійснення процесу на конверсію метилпропіонату, селективність утворення та вихід метилметакрилату та метакрилової кислоти; встановлено оптимальний за вмістом промотора каталізатор та оптимальну температуру здійснення досліджуваного процесу.

Ключові слова: метилпропіонат, метилметакрилат, альдольна конденсація, каталізатор, формальдегід.

АННОТАЦИЯ Статья посвящена исследованию процесса получения метилметакрилата альдольной конденсацией метилпропионата с формальдегидом в газовой фазе в присутствии катализаторов на основе оксидов бора и фосфора, промотированных оксидом вольфрама. Определено влияние содержания WO_3 в катализаторе и температуры осуществления процесса на конверсию метилпропионата, селективность образования и выход метилметакрилата и метакриловой кислоты; установлен оптимальный по содержанию промотора катализатор и оптимальная температура осуществления исследуемого процесса.

Ключевые слова: метилпропионат, метилметакрилат, альдольная конденсация, катализатор, формальдегид.

ALDOL CONDENSATION OF METHYL PROPIONATE WITH FORMALDEHYDE OVER B_2O_3 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2 CATALYSTS**Y. DMYTRUK^{1*}, R. NEBESNYI¹, V. IVASIV¹, O. MATSKIV²**¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE²Lviv Institute of Economy and Tourism, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT Aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde in the gas phase is a perspective method of obtaining of methyl methacrylate, which is an important monomer in the chemicals industry. The development of this method, namely the search for effective catalysts for this process allows to significantly simplify the industrial production of methyl methacrylate. The aim of this paper is to study the activity of catalysts based on a mixture of boron and phosphorus oxides and promoted by tungsten oxide in the process of aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde in the gas phase. B_2O_3 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2 catalysts containing different amounts of tungsten oxide were investigated. Methyl propionate condensation process with formaldehyde was performed at contact time of 12 s in the temperature range of 563 – 683 K. Methacrylic acid was also formed during the process. It was found that the catalyst with the atomic ratio W/P 0.3 was most effective in the process. In the presence of this catalyst at 653 K total methyl methacrylate and methacrylic acid yield was 48.8 %, while their total selectivity was 49.1 %. The optimum temperature for the process was determined to be 653 K.

Keywords: methyl propionate, methyl methacrylate, aldol condensation, catalyst, formaldehyde.

Вступ

Виробництво акрилатних мономерів є важливою галуззю промисловості органічного синтезу. Серед цінних сполук акрилового ряду – акрилова та метакрилова кислоти та їх естери: метилакрилат, етилакрилат, метилметакрилат, етилметакрилат та ін. Особливу цінність з-поміж цих мономерів має метилметакрилат (ММА), що використовується для виробництва органічного скла та інших полімерів і співполімерів [1-3]. З матеріалів на основі поліметилметакрилату виготовляють захисні екрани та звукові бар'єри, дисплеї мобільних

телефонів та ноутбуків, оптичні лінзи, кістковий цемент, зубні протези, лаки, фарби та інші покриття, освітлювальне обладнання тощо [4-8]. Попит на ММА та його похідні щороку зростає [9], а тому актуальним завданням є удосконалення існуючих та розроблення нових методів виробництва метилметакрилату.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

Ацетонціангідриновий метод був першим промислово впровадженим та на сьогодні залишається одним із найбільш поширених методів

© Ю. В. ДМИТРУК*, Р. В. НЕБЕСНИЙ, В. В. ІВАСІВ, О. О. МАЦЬКІВ, 2015

одержання MMA. Цей метод, що полягає в синтезі ацетонціангідрину з ацетону та ціанідної кислоти, його подальшому гідролізі та естерифікації [9-10], в останні роки був значно модифікований, що дозволило зменшити використання токсичних кислот та утворення великої кількості побічного продукту (сульфату амонію) [11]. Однак велика кількість стадій цього методу зумовлює складне апаратне оформлення процесу, тому частка цього методу в промисловому виробництві MMA поступово знижується.

Серед інших методів одержання метилметакрилату комерціалізованими є окиснення ізобутилену та ізобутилового спирту через проміжне утворення метакролеїну чи метакрилової кислоти, конденсація пропіональдегіду з формальдегідом з подальшим окисненням та естерифікацією та ін. Однак ці методи не набули великого поширення через невисоку селективність процесу [9].

Найбільш перспективним щодо впровадження у промисловість методом одержання MMA є газова конденсація метилпропіонату з формальдегідом на твердих каталізаторах (т. зв. "альфа"-процес) [9, 12]. Активне розроблення цього методу розпочалось після налагодження виробництва метилпропіонату в промислових масштабах шляхом карбонілювання етилену в присутності метанолу. Таким чином, з'явилася можливість суттєво спростити виробництво MMA, зменшивши загальну кількість його стадій та використовуючи доступну сировину. Серед інших переваг "альфа"-процесу – відсутність необхідності використовувати токсичні реагенти та невелика кількість відходів та побічних продуктів, які можна переробляти або ж виділяти та використовувати самостійно як товарні продукти [9, 12-15]. Важливим для успішного впровадження виробництва MMA вказаним методом є наявність ефективних каталізаторів реакції конденсації метилпропіонату з формальдегідом. Тому актуальним є розроблення каталізаторів цього процесу.

У попередніх дослідженнях встановлено, що промотування каталізатора на основі оксидів бору та фосфору, нанесених на силікагель, оксидами перехідних металів дозволяє підвищити його активність у процесах одержання акрилової та метакрилової кислот конденсацією формальдегіду з оцтовою та пропіоновою кислотами відповідно [16-19]. Серед досліджених промоторів (V_2O_5 , WO_3 , MoO_3 , ZnO) у процесі одержання метакрилової кислоти альдольною конденсацією найбільш ефективним був оксид вольфраму [19-20]. Тому ці каталізатори було вирішено випробувати в процесі газофазної конденсації метилпропіонату з формальдегідом.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи – дослідити ефективність каталізаторів на основі суміші оксидів бору, фосфору

та вольфраму з різним його вмістом у процесі одержання метилметакрилату газофазною конденсацією метилпропіонату з формальдегідом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- визначити вплив вмісту оксиду вольфраму на конверсію метилпропіонату, селективність утворення та вихід метилметакрилату;
- встановити оптимальний за вмістом оксиду вольфраму каталізатор досліджуваного процесу;
- встановити оптимальну температуру здійснення процесу конденсації метилпропіонату з формальдегідом.

Матеріали та методи досліджень

Дослідження активності каталізаторів V_2O_5 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2 здійснювали в проточній установці з імпульсною подачею реагентів та стаціонарним шаром каталізатора. Вміст оксиду вольфраму змінювали таким чином, щоб атомне співвідношення W/P становило 0,1; 0,3; 0,6; 1,0. Каталізатори готували методом просочування.

Для дослідження процесу конденсації метилпропіонату з формальдегідом використовували реакційну суміш з еквімолярним співвідношенням вихідних реагентів. Як джерело формальдегіду використовували формалін. Температуру змінювали в межах 563 – 683 K, час контакту становив 12 с. Продукти реакції аналізували хроматографічним методом.

В ході процесу, крім MMA, утворювалися також діетилкетон, пропіонова кислота та метанол (продукти гідролізу метилпропіонату). Крім того, утворювалася значна кількість метакрилової кислоти (як внаслідок гідролізу метилметакрилату, так і внаслідок конденсації утвореної пропіонової кислоти з формальдегідом). Метакрилову кислоту можна піддавати подальшій естерифікації метанолом з утворенням MMA або виділяти та використовувати як окремий товарний продукт.

Результати досліджень та їх обговорення

У результаті досліджень встановлено, що збільшення вмісту оксиду вольфраму в каталізаторі мало впливає на конверсію метилпропіонату (рис. 1). Проте конверсія насиченого естеру суттєво зростає зі збільшенням температури здійснення реакції. Так, максимальне значення конверсії метилпропіонату становило 99,9 % при температурі 683 K в присутності каталізатора з атомним співвідношенням W/P 1,0. Найнижчою конверсією насиченого естеру була зафіксована при температурі 563 K в присутності цього ж каталізатора.

Залежність селективності утворення цільових продуктів (метилметакрилату та метакрилової кислоти) від температури на каталізаторах з різним вмістом оксидом вольфраму має максимум (рис. 2).

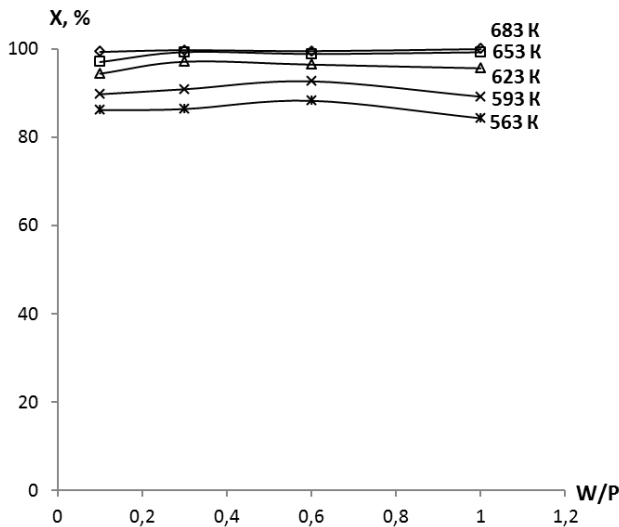


Рис. 1 – Залежність конверсії метилпропіонату (X, %) від вмісту оксиду вольфраму в каталізаторі (W/P) в інтервалі температур 563 – 683 K

Так, найвище значення сумарної селективності утворення метилметакрилату та метакрилової кислоти одержано при температурі 653 K в присутності каталізатора з атомним співвідношенням W/P 0,3 – 49,1 %, а найнижче – при температурі 563 K в присутності каталізатора з атомним співвідношенням W/P 0,1 – 2,0 %.

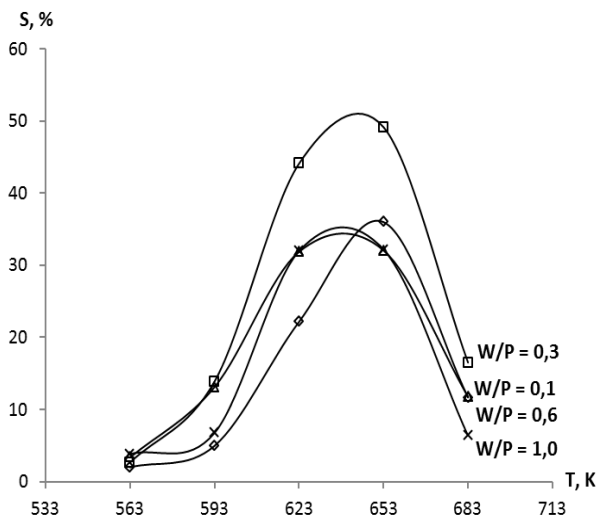


Рис. 2 – Залежність сумарної селективності утворення метилметакрилату та метакрилової кислоти (S, %) від температури (T, K) в присутності каталізаторів із різним атомним співвідношенням W/P

Також добре помітно, що каталізатор з атомним співвідношенням W/P 0,3 забезпечує суттєво вищу, порівняно з рештою досліджених каталізаторів, селективність утворення ненасичених продуктів за тих самих умов здійснення процесу.

Залежність виходу метилметакрилату та метакрилової кислоти від вмісту промотора в каталізаторі також має максимум (рис. 3).

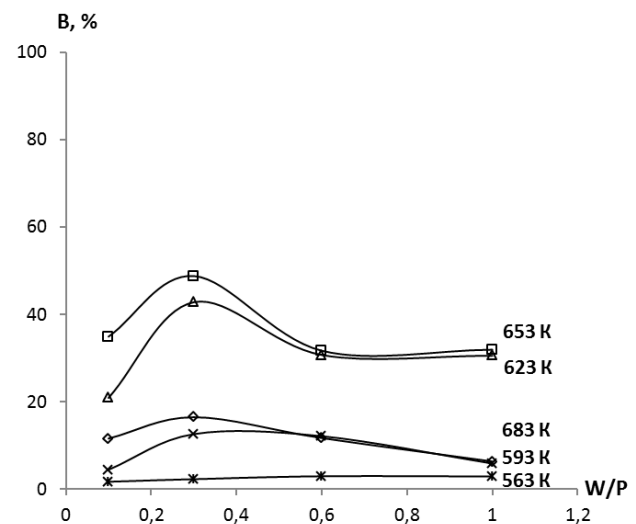


Рис. 3 – Залежність сумарного виходу метилметакрилату та метакрилової кислоти (B, %) від вмісту оксиду вольфраму в каталізаторі (W/P) в інтервалі температур 563 – 683 K

Видно, що найвищий вихід цільових продуктів – 48,8 % – забезпечує каталізатор з атомним співвідношенням W/P 0,3 при температурі 653 K. Мінімальне значення сумарного виходу метилметакрилату та метакрилової кислоти (всього 1,7 %) одержано при температурі 563 K в присутності каталізатора з атомним співвідношенням W/P 1,0.

Таким чином, найвищу ефективність у процесі альдольної конденсації метилпропіонату з формальдегідом проявив каталізатор, в якому атомне співвідношення W/P становить 0,3. Отже, такий вміст промотора (оксиду вольфраму) в каталітичній системі $B_2O_3-P_2O_5-WO_3/SiO_2$ є оптимальним для досліджуваного процесу. При температурі 653 K та часі контакту 12 с цей каталізатор забезпечує сумарний вихід метилметакрилату та метакрилової кислоти 48,8 % при селективності їх утворення 49,1 %. Цей каталізатор із дослідженої серії проявив найвищу активність і в процесі конденсації пропіонової кислоти з формальдегідом з утворенням метакрилової кислоти. Так, вихід метакрилової кислоти в присутності цього каталізатора становив 44,1 % [18].

Висновки

Встановлено, що каталітичні системи на основі оксидів бору та фосфору, промотовані оксидом вольфраму, є активними в процесі газофазної альдольної конденсації метилпропіонату з формальдегідом з утворенням метилметакрилату та метакрилової кислоти. Визначено, що збільшення вмісту WO_3 в каталізаторі практично не впливає на конверсію вихідних реагентів, проте зумовлює підвищення селективності утворення цільових продуктів.

Встановлено оптимальний за вмістом оксиду вольфраму каталізатор (із атомним співвідношенням W/P 0,3), який забезпечує вихід ненасичених продуктів за один прохід 48,8 % при селективності їх утворення 49,1 %. Утворену внаслідок гідролізу метилпропіонату пропіонову кислоту необхідно подавати на естерифікацію метанолом, після чого направляти на стадію альдольної конденсації метилпропіонату з формальдегідом.

Список літератури

- Patent** 6462157 US, Methylmethacrylate/acrylic acid copolymer antinoise sheets / *Stasi, Alberto Luca* (Milan, IT), *Giberti, Fabio* (Milan, IT), *De Marco, Cristiano* (Varese, IT); assignee: Atofina (Paris, FR). – № 037678; filing date: 10.03.1998; publication date: 08.10.2002.
- Patent** 4231905 US, Polymethylmethacrylate cellulosic copolymer lens material / *Neeffe, Charles W.* (Big Spring, TX); assignee: Neeffe, Optical Laboratory (Big Spring, TX). – № 051345; filing date: 25.06.1979; publication date: 04.11.1980.
- Patent** JP09302191 JP, Methacrylic resin composition / *Sawano Tetsuya, Nakauchi Jun*; assignee: Mitsubishi Rayon Co Ltd. – № JP1996000142346; filing date: 14.05.1996; publication date: 25.11.1997.
- Patent** 7579406 US, Transparent thermoplastic resin compositions and process for preparing the same / *Choi, Jeong-su* (Daejeon, KR), *Lee, Mi-young* (Seoul, KR), *Bahn, Hyong-min* (Yeosu-si, KR) and others; assignee LG Chem, Ltd. (KR). – № 206581; filing date: 18.08.2005; publication date: 25.08.2009.
- Patent** JP2009144009 JP, (Meth)acrylic coating material and coated material coated with the same / *Sakamoto Yoshiko, Tsuchiya Nobuyuki, Makino Tomonori, Narimatsu Hiroshi*; assignee: NISSHIN STEEL CO LTD. – № JP2007000321315; filing date: 12.12.2007; publication date: 02.07.2009.
- Patent** 7416783 US, Resin particles comprising a (meth)acrylate copolymer and a surfactant having a sulfonic-acid or sulfonate group / *Higashi, Takashi* (Wakayama, JP), *Kito, Tetsuji* (Wakayama, JP), *Sasaki, Yasushi* (Wakayama, JP), *Nambu, Hiromi* (Wakayama, JP); assignee: Kao Corporation (Tokyo, JP). – № 590998; filing date: 26.05.2005; publication date: 26.08.2008.
- Patent** 7655706 US, Polymethylmethacrylate bone cement / *Kühn, Klaus-dieter* (Marburg, DE), *Vogi, Sebastian* (Erfurt, DE); assignee: Heraeus Kulzer GmbH (Hanau, DE). – № 447807; filing date: 06.06.2006; publication date: 02.02.2010.
- Patent** 5718830 US, Method for making microlenses / *Hlinka, Charles George* (Lebanon, NJ), *Markham, Janet Louise* (Middlesex, NJ), *Nijander, Casimir Roman* (Lawrenceville, NJ) and others; assignee: Lucent Technologies Inc. (Murray Hill, NJ). – № 601805; filing date: 15.02.1996. publication date: 17.02.1998.
- Nagai, K.** New developments in the production of methyl methacrylate / **Koichi Nagai** // *Applied Catalysis A: General*. – 2001. – Vol. 221 (1-2). – P. 367-377.
- Wittcoff, H. A.** Industrial organic chemicals. Second edition / **H. A. Wittcoff, B. G. Reuben, J. S. Plotkin** // John Wiley & Sons, 2004. – P. 188–193.
- Patent** EP0941984A2 EP, Method of producing a methyl methacrylate / *Kida, K.*; assignee: Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc. (Tokyo, JP). – № 99103069.3; filing date: 17.02.1999; publication date: 15.09.1999.
- Methyl Methacrylate. PERP 08/09-7. Report Abstract. / Nexant ChemSystems, 2010.
- Gogate, M. R.** Synthesis of methyl methacrylate by vapor phase condensation of formaldehyde with propionate derivatives / **M. R. Gogate, J. J. Spivey, J. R. Zoeller** // *Catalysis Today*. – 1997. Vol. 36. – P. 243-254.
- Ai, M.** Formation of methyl methacrylate by condensation of methyl propionate with formaldehyde over silica-supported cesium hydroxide catalysts / **Mamoru Ai** // *Applied Catalysis A: General*. – 2005. – Vol. 288. – P. 211–215.
- Li, B.** Synthesis of methyl methacrylate by aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde over acid–base bifunctional catalysts / **B. Li, R. Yan, L. Wang, Y. Diao, Z. Li, S. Zhang** // *Catalysis Letter*. – 2013. – Vol. 143, Issue 8. – P. 829-838.
- Небесний, Р. В.** Конденсація оцтової та пропіонової кислот з формальдегідом в акрилової та метакрилової кислоти у газовій фазі / **Р. В. Небесний, В. В. Івасів, В. М. Жизневський, С. В. Шибанов** // *Вопросы химии и химической технологии*. – Дніпропетровськ. – 2009. – №3. – С.35-36.
- Nebesnyi, R.** Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde. / **R. Nebesnyi, V. Ivasiv, Y. Dmytruk, N. Lapychak** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2013. – Vol. 6/6(66). – P. 40-42.
- Небесний, Р.В.** Одержання метакрилової кислоти в присутності $B_2O_3-P_2O_5-WO_3/SiO_2$ каталізаторів / **Р. В. Небесний, В. В. Івасів, В. М. Жизневський, Ю. В. Дмитрук, С. В. Шибанов** // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка", "Хімія, технологія речовин та їх застосування"*. – 2011. – № 700. – С. 205-207.
- Небесний, Р. В.** Метакрилової кислота. Одержання конденсацією пропіонової кислоти з формальдегідом у газовій фазі / **Р. В. Небесний, В. В. Івасів, В. М. Жизневський, З. Г. Піх** // *Хімічна промисловість України*. – 2012. – № 1. – С. 3-6.
- Nebesnyi, R.** The kinetic of the gas phase aldol condensation reaction of propionic acid with formaldehyde on $B_2O_3 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2$ catalyst. / **Nebesnyi, R., Ivasiv, V., Pikh, Z., Zhyznevskiy, V., Dmytruk, Y.** *Chemistry & Chemical Technology*. – 2014. – № 8(1). – С. 29-34.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Patent** 6462157 US, Methylmethacrylate/acrylic acid copolymer antinoise sheets / *Stasi, Alberto Luca* (Milan, IT), *Giberti, Fabio* (Milan, IT), *De Marco, Cristiano* (Varese, IT); assignee: Atofina (Paris, FR). – № 037678; filing date: 10.03.1998; publication date: 08.10.2002.
- 2 **Patent** 4231905 US, Polymethylmethacrylate cellulosic copolymer lens material / *Neefe, Charles W.* (Big Spring, TX); assignee: Neefe, Optical Laboratory (Big Spring, TX). – № 051345; filing date: 25.06.1979; publication date: 04.11.1980.
- 3 **Patent** JP09302191 JP, Methacrylic resin composition / *Sawano Tetsuya, Nakauchi Jun*; assignee: Mitsubishi Rayon Co Ltd. – № JP1996000142346; filing date: 14.05.1996; publication date: 25.11.1997.
- 4 **Patent** 7579406 US, Transparent thermoplastic resin compositions and process for preparing the same / *Choi, Jeong-su* (Daejeon, KR), *Lee, Mi-young* (Seoul, KR), *Bahn, Hyong-min* (Yeosu-si, KR) and others; assignee LG Chem, Ltd. (KR). – № 206581; filing date: 18.08.2005; publication date: 25.08.2009.
- 5 **Patent** JP2009144009 JP, (Meth)acrylic coating material and coated material coated with the same / *Sakamoto Yoshiko, Tsuchiya Nobuyuki, Makino Tomonori, Narimatsu Hiroshi*; assignee: NISSHIN STEEL CO LTD. – № JP2007000321315; filing date: 12.12.2007; publication date: 02.07.2009.
- 6 **Patent** 7416783 US, Resin particles comprising a (meth)acrylate copolymer and a surfactant having a sulfonic-acid or sulfonate group / *Higashi, Takashi* (Wakayama, JP), *Kito, Tetsuji* (Wakayama, JP), *Sasaki, Yasushi* (Wakayama, JP), *Nambu, Hiromi* (Wakayama, JP); assignee: Kao Corporation (Tokyo, JP). – № 590998; filing date: 26.05.2005; publication date: 26.08.2008.
- 7 **Patent** 7655706 US, Polymethylmethacrylate bone cement / *Kühn, Klaus-dieter* (Marburg, DE), *Vogt, Sebastian* (Erfurt, DE); assignee: Heraeus Kulzer GmbH (Hanau, DE). – № 447807; filing date: 06.06.2006; publication date: 02.02.2010.
- 8 **Patent** 5718830 US, Method for making microlenses / *Hlinka, Charles George* (Lebanon, NJ), *Markham, Janet Louise* (Middlesex, NJ), *Nijander, Casimir Roman* (Lawrenceville, NJ) and others; assignee: Lucent Technologies Inc. (Murray Hill, NJ). – № 601805; filing date: 15.02.1996. publication date: 17.02.1998.
- 9 **Nagai, K.** New developments in the production of methyl methacrylate. *Applied Catalysis A: General*. – 2001. – № 221 (1-2). – P. 367-377.
- 10 **Wittcoff, H. A., Reuben, B. G., Plotkin, J. S.** Industrial organic chemicals / *Second edition. John Wiley & Sons*. – 2004. – P. 188-193.
- 11 **Patent** EP0941984A2 EP, Method of producing a methyl methacrylate / *Kida, K.*; assignee: Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc. (Tokyo, JP). – № 99103069.3; filing date: 17.02.1999; publication date: 15.09.1999.
- 12 Methyl Methacrylate. PERP 08/09-7. Report Abstract. / *Nexant ChemSystems*, 2010.
- 13 **Gogate, M. R., Spivey, J. J., Zoeller, J. R.** Synthesis of methyl methacrylate by vapor phase condensation of formaldehyde with propionate derivatives // *Catalysis Today*, 1997, № 36, P. 243-254.
- 14 **Ai, M.** Formation of methyl methacrylate by condensation of methyl propionate with formaldehyde over silica-supported cesium hydroxide catalysts // *Applied Catalysis A: General*. – 2005. – № 288. – P. 211-215.
- 15 **Li, B., Yan, R., Wang, L., Diao, Y., Li, Z., Zhang, S.** Synthesis of methyl methacrylate by aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde over acid-base bifunctional catalysts / *Catalysis Letter*. – 2013. – № 143 (8). – P. 829-838.
- 16 **Nebesnyi, R. V., Ivasiv, V. V., Zhyznevskiy, V. M., Dmytruk, Y. V., Shybanov, S. V.** Condensation of acetic and propionic acids with formaldehyde yielding acrylic and methacrylic acids in the gas phase. *Voprosy khimii i khimicheskoi tehnologii*. – 2009. – № 3. – P. 35-36.
- 17 **Nebesnyi, R., Ivasiv, V., Dmytruk, Y., Lapychak, N.** Acrylic acid obtaining by acetic acid catalytic condensation with formaldehyde / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2013. – № 6/6(66). – P. 40-42.
- 18 **Nebesnyi, R. V., Ivasiv, V. V., Zhyznevskiy, V. M., Dmytruk, Y. V., Shybanov, S. V.** Methacrylic acid obtaining over B₂O₃-P₂O₅-WO₃/SiO₂ catalysts / *Visnyk Natsionalnoho universytetu "L'vivs'ka politechnica", "Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya"*. – 2011. – № 700. – P. 205-207.
- 19 **Nebesnyi, R. V., Ivasiv, V. V., Zhyznevskiy, V. M., Pikh, Z. G.** Methacrylic acid. Obtaining by condensation of propionic acid with formaldehyde in the gas phase / *Khimichna promyslovist' Ukrainy*. – 2012. – № 1. – P. 3-6.
- 20 **Nebesnyi, R., Ivasiv, V., Pikh, Z., Zhyznevskiy, V., Dmytruk, Y.** The kinetic of the gas phase aldol condensation reaction of propionic acid with formaldehyde on B₂O₃ – P₂O₅ – WO₃/SiO₂ catalyst / *Chemistry & Chemical Technology*. – 2014. – № 8 (1). – P. 29-34.

Надійшла (received) 20.05.2015

УДК 541.124:547

МЕТОДОЛОГІЯ ВИВЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СОЛОДКИХ СТРАВ ІЗ КАПСУЛЬОВАНИМИ ПРОБІОТИЧНИМИ МІКРООРГАНІЗМАМИ

Н. В. КОНДРАТЮК

Кафедра харчових технологій, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара,
м. Дніпропетровськ, УКРАЇНА
email: kondratjuk_nata@mail.ru

АНОТАЦІЯ Проведено дослідження показників якості солодких страв з капсульованими мікроорганізмами (*Bifidobacterium lactis* BB 12). Вивчено вплив капсульованих об'єктів на основні властивості кінцевих продуктів (солодких страв із пінною структурою). Встановлено закономірності керування процесами формування показників якості нових видів кулінарної продукції.

Ключові слова: солодкі страви, капсульовані мікроорганізми, пробіотичні продукти, міцність драглів, кислотність.

АННОТАЦИЯ Проведены исследования показателей качества сладких блюд с капсулированными микроорганизмами (*Bifidobacterium lactis* BB 12). Изучено влияние капсулированных объектов на основные свойства конечных продуктов (сладких блюд из пенной структурой). Установлены закономерности управления процессами формирования показателей качества новых видов кулинарной продукции.

Ключевые слова: сладкие блюда, капсулированные микроорганизмы, пробіотические продукты, прочность студней, кислотность

THE METHODOLOGY OF THE STUDY DESSERTS WITH ENCAPSULATED PROBIOTIC MICROORGANISMS INDICATORS QUALITY

N. KONDRATJUK

Department of Food Technology, Dnipropetrovs'k national university by Oles Honchar, Dnipropetrovs'k, UKRAINE

ABSTRACT At the article discusses the procedure of quality indicators studying in samples of desserts (cream, mousse and sambuc) with encapsulated probiotic microorganisms. The purpose of research is to establish laws governing the formation of the concept of "quality" for a fundamentally new types of food products containing encapsulated form probiotic microorganisms, particularly *Bifidobacterium lactis* BB 12).

Experimentally investigated the organoleptic, physico-chemical and microbiological figures, such as: jelly strength, acidity, which are forming a complex concept of "quality" in food systems with structured-encapsulated suite facilities.

It was fixed the region of the optimal values of making encapsulated objects in the food environment in which the resulting products has a high quality.

The research of results can be applied to the organization of the manufacturing process for the production of gelled desserts with the foam structure, enriched encapsulated form of live probiotic microorganisms.

Established laws allow for the control of the processes quality indicators formation at the fundamentally new types of food products.

Keywords: sweet dishes, encapsulated microorganisms, probiotic products, jelly strength, acidity

Вступ

Проблема балансу харчових компонентів постає перед кожною людиною щодня, оскільки вона постійно відчуває психічно-нервові навантаження, емоційну нестійкість, зміни звичних умов життя тощо. Активність дій у напрямку вирішення означеної проблеми набуває ефективності тільки у разі раціоналізації харчових раціонів, зокрема створення пропозицій таких продуктів, які мають комплексну позитивну дію на організм людини. На сьогодні, переважна більшість населення не спроможна організувати належним чином власний раціон харчування. За браком інформації і, навіть, часу для осмислення наявних її джерел, постає проблема

дисбалансу харчових речовин, нестача рівня їх засвоєння тощо.

Першими на такі негативні зміни реагують біфідобактерії, що оселяють товстий кишечник і виконують імуномодельючу функцію в організмі [1, 2]. Тому, слід розробляти такі продукти, які були б максимально спроможні відновити кількісний склад біфідобактерій у найкоротші терміни, враховуючи їх нестійкість до кислотного середовища та кисню.

Капсульні оболонки на основі альгінату натрію [3, 4] дозволяють утримати задану кількість біфідобактерій в активній формі до моменту їх «вилучення» з капсули [5]. Важливий вплив на перебіг подій, пов'язаних із «життєвим» циклом капсульованих продуктів в організмі людини, має

харчове середовище, яке є «носієм» капсульних об'єктів, та вміст капсули – інкапсулянт [6-8]. Основні показники якості харчового середовища дозволяють спрогнозувати кінетичні явища процесу транспортування біфідобактерій. Для прискорення постачання краще обрати харчові композиції, що є дуже приємними на смак та запах, крім того легко та швидко ковтаються і повномірно засвоюються. Інформації за цим питанням, нажаль, бракує. Тому результати, приведені у статті, стануть корисними під час розробки асортименту кулінарної продукції на основі капсульованих продуктів з пробіотичними мікроорганізмами.

Мета роботи

Метою роботи стало дослідження показників якості солодких страв (крему ванільного, мусу яблучного на крупі манній та самбуку яблучного) з капсульованими пробіотичними мікроорганізмами за допомогою фізико-хімічних, мікробіологічних та органолептичних методів аналізу.

Викладення основного матеріалу

У роботі піноутворюючу здатність, стійкість пін визначали за методиками, описаними у праці [9], модуль пружності гелеподібних систем – за Валентом, загальна кислотність, кількість сухих речовин, відповідно до неї відсоток вологи та мікробіологічні показники визначалися за стандартними методиками.

Загальну органолептичну оцінку (ЗОО) зразків самбуку, мусу та крему побудовано на чуттєвому сприйманні системи «ХСС-КО» («харчове структуроване середовище – капсульні об'єкти») у цілому, і виражено у балах. Найвищі значення ЗОО набувають зразки солодких страв із вмістом КО = 15...25% (рис. 1 а-в).

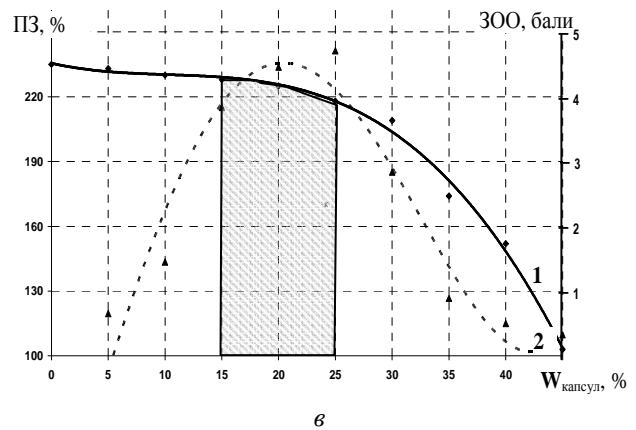
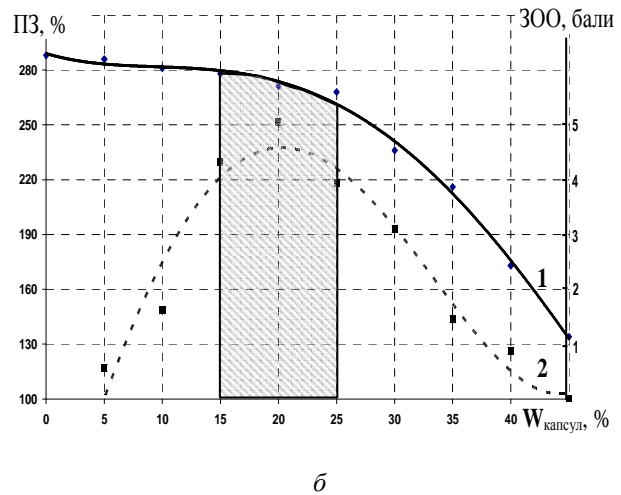
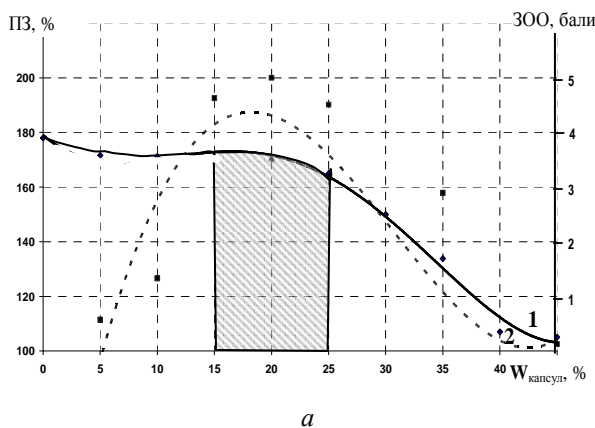


Рис. 1 – Динаміка піноутворюючої здатності (1) та загальної органолептичної оцінки (2) від кількості внесених КО до ХСС: а – самбук; б – мус; в – крем

Однією з важливих технологічних характеристик драгелеподібних солодких страв, є їх міцність, що виражається модулем пружності. Результати вимірювань цього показника на зразках самбуку, мусу та крему наведено на рис. 2 а-в відповідно.

З результатів візуальних спостережень та загальної органолептичної оцінки готових виробів стало відомо, що відсоток внесення капсульних об'єктів повинен становити 20%. З наведених залежностей видно, що внесення капсульних об'єктів (КО) у кількості 20% майже не пошкоджує сітки гелю, утвореного желатином, а невелике зниження міцності пов'язано з тим, що в момент натискання грибовидної насадки приладу, відбувається висковзування альгінатної капсули. При цьому відбувається стрімке перетворення накопиченої потенційної енергії стрижня у кінетичну, що й надає незначної розбіжності (не більше 10 %) у показниках міцності. У зразках мусу початкова міцність ХСС найвища серед досліджуваних систем, тому вміст КО у кількості 5...25% майже не змінив її показників. Збільшення кількості КО з 25 до 50% в усіх досліджуваних зразках, вплинуло на зміцнення ХСС:

для самбуку приблизно на 5%; мусу – 4%; крему – 3%.

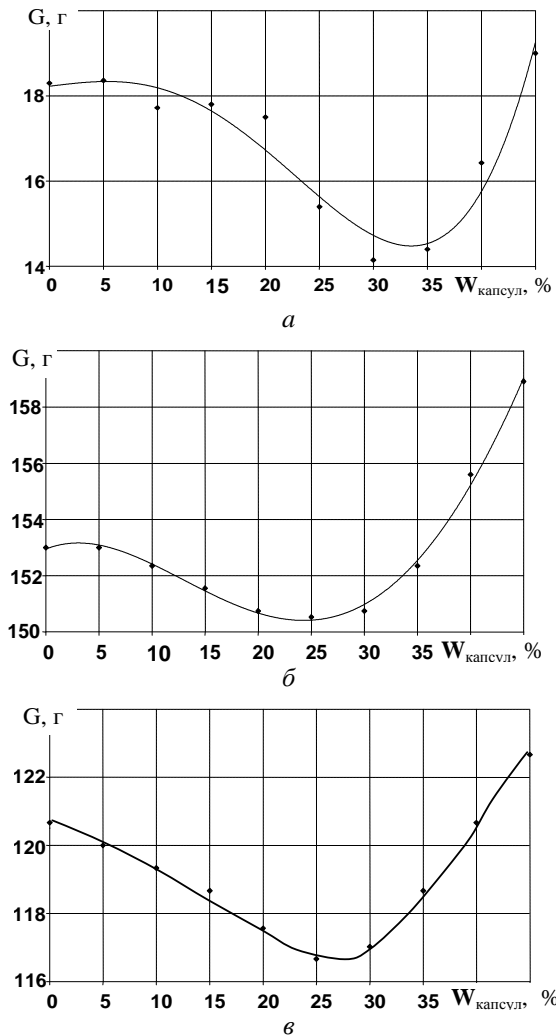


Рис. 2 – Динаміка показників міцності від кількості внесених КО до ХСС: а – самбук; б – мус; в - крем

На наступному етапі визначалися кількість сухих речовин та кислотність, як фізико-хімічні фактори регулювання якості солодких страв з капсульованими пробіотичними мікроорганізмами. Інформацію щодо порівняльного аналізу отриманих даних із аналогами солодких страв, виготовлених за класичними рецептурами, зведено у таблицю 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники якості зразків солодких страв

Показник	Крем	Крем з КО	Мус	Мус з КО	Сам-бук	Сам-бук з КО
Видимий вміст сухих речовин, %	41,8	33,6	21,9	20,0	34,1	27,4
Кислотність	17**	17**	0,6*	0,6*	0,8*	0,8*

Примітка. * у % на яблучну кислоту; ** у °Т

Оскільки розроблені зразки солодких страв мають пінну структуру, то й дослідження стійкості пін стало доцільним для харчових систем, що розглядаються (рис. 3). Крім того, стійкість пін формує важливий показник загальної споживацької оцінки – зовнішній вигляд, який не повинен змінюватись упродовж зберігання.

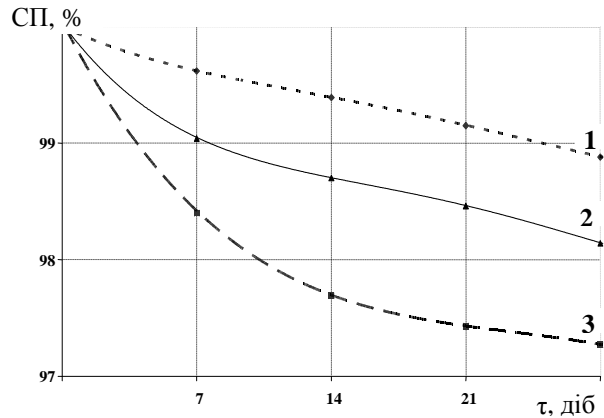


Рис. 3 – Динаміка стійкості пін у зразках солодких страв з КО: 1 – мус; 2 – крем; 3 – самбук за умов зберігання при $t = 4...6^{\circ}C$

З рис. 3 наочно видно, що стійкість пін упродовж 28 діб залишається майже незмінною. Порівняно із аналогами на основі молока або молочних продуктів, за такого тривалого зберігання титр внесених пробіотичних мікроорганізмів не здатен утриматися на позначці початково внесеного, тому цікавим стало дослідити кількість активних біфідобактерій, протягом вказаного терміну, у розроблених солодких стравах (рис. 4).

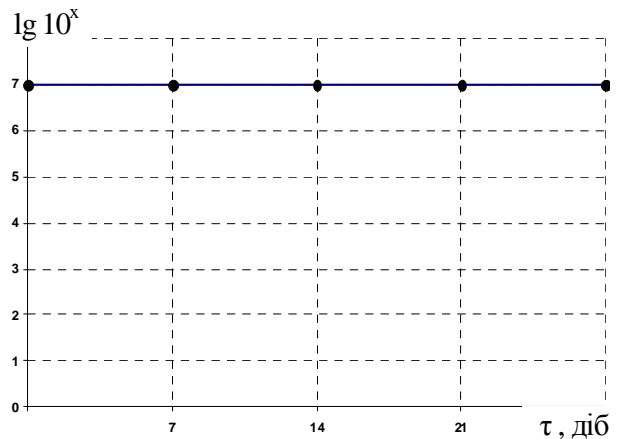


Рис. 4 – Динаміка вмісту біфідобактерій BB-12 у зразках солодких страв з КО за умов зберігання $t = 4...6^{\circ}C$

Кислотність – ще один критерій оцінювання якості даного виду кулінарної продукції. Як вже було раніше доведено, оболонка капсули є кислотостійкою

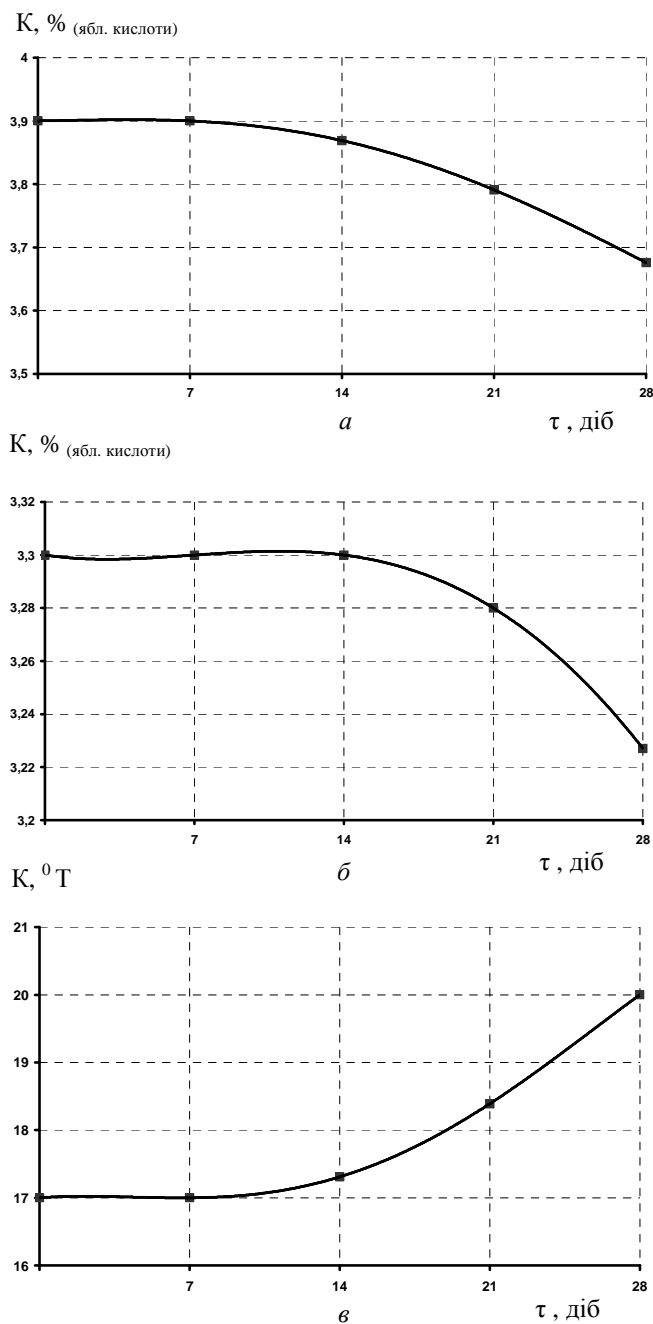


Рис. 5 – Кислотність зразків:
а – мусу; б – самбуку; в – крему
протягом зберігання при $t = 4...6^{\circ}\text{C}$

[10], тому на рис. 5 а-в наведені результати дослідження змін кислотності тільки у ХСС зразків.

З моніторингу активної кислотності (рис. 5) видно, що протягом 12 діб зберігання за $t = 4...6^{\circ}\text{C}$, змін у досліджуваних зразках не відбувається.

Слід зазначити, що навіть на 14-ту добу зміни органолептично не визнавалися. Починаючи з 15 доби зразки вважалися зіпсованими.

Обговорення результатів

Кулінарна продукція, що містить капсульовані пробіотичні мікроорганізми, зокрема біфідобактерії, є радикально новою пропозицією на сучасному ринку харчової продукції, що має функціональні властивості. Тому питання харчової безпеки та якості таких товарів повинно бути вирішено у повному обсязі. Для цього найдоцільніше скористатися запропонованою у статті методологією, яка ґрунтується на результатах окремих випробувань зразків нової продукції.

Отже, основними показниками якості солодких страв з пінною структурою та вмістом капсульованих пробіотичних мікроорганізмів є міцність драглів, що відповідає за консистенцію готового продукту, стійкість пін, що регулює зовнішній вид, кислотність, стабільність якої гарантує високі смакові властивості та вміст колонієутворюючих одиниць, що відповідає за заявлені пробіотичні властивості.

За результатами мікробіологічних досліджень зразків встановлено, що протягом 28 діб, жоден із них не містив представників БГКП, МАФМ, дріжджів та пліснявих грибів. Кількість представників корисної мікрофлори становила 10^7 КУО/г. Таким чином, обґрунтовані параметри технології промислового виробництва солодких страв із напівфабрикатом «Продукт капсульований з пробіотичними мікроорганізмами».

Висновки

Проведені дослідження дозволили обґрунтувати вміст напівфабрикату «Продукт капсульований з пробіотичними мікроорганізмами» (20%) у рецептурному складі готової продукції, а окреслена методологія випробувань – встановити критерії оцінювання якості нової продукції: крему, мусу та самбуку з використанням капсульованих пробіотичних мікроорганізмів. Узагальнені дані свідчать, що титр біфідобактерій залишається функціональним протягом рекомендованого терміну зберігання, як і інші показники якості готової продукції.

Список літератури

- 1 **Деркач, Т. М.** Сучасні наукові напрями в харчуванні : навч. посібник / **Т. М. Деркач, Н. В. Кондратюк.** – Дніпропетровськ: ДНУ/ – 2009. – 238 с.
- 2 **Haschke, F.** Clinical trials prove the safety and efficacy of the probiotic strain Bifidobacterium Bb12 in follow-up formula and growing-up milks / **F. Haschke, W. Wang, P. Guozai et al.** // *Monatsschr Kinderhelikd Suppl.* – 1998. – № 1 (146). – P. 526-530.
- 3 **Bregni, C.** Alginate microspheres of Bacillus subtilis / **C. Bregni, J. Degrossim, R. Garcia,** et al. // *Ars. Pharmaceutica.* – 2000. – № 41(3). – P. 245-248.
- 4 **Draget, K. I.** Alginates from Algae. Biosynthesis and Biodegradation / **K. I. Draget, O. Smidsrod, G. Skjåk-Braæk.**

- Wenheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 2005. – 30 p.
- 5 **Кондратюк, Н. В.** Технологія солодких страв з використанням капсульованих продуктів з пробіотичними мікроорганізмами / **Н. В. Кондратюк** // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харків. – 2012. – 19 с.
 - 6 **Sheu, T. Y.** Improving Survival of Culture Bacteria in Frozen Desserts by Microentrapment / **T. Y. Sheu, R. T. Marshall, H. Heymann** // *J. Dairy Sci.* – 1993. – № 76. – P. 1902-1907.
 - 7 **Lee, K. Y.** Survival of Bifidobacterium longum Immobilized in Calcium Alginate Beads in Simulated Gastric Juices and Bile Salt Solution / **K. Y. Lee, T. R. Heo** // *J. Dairy Sci.* – 2000. – 66 (2). – P. 869-873.
 - 8 **Jung, J. K.** Survival of Double – Microencapsulated Bifidobacterium brm in Milk in Simulated Gastric and Small Intestinal Conditions / **J. K. Jung, J. H. Kil, S. K. Kim** et al. // *J. Food Sci. Nutr.* – 2007. – № 12. – P. 58-63.
 - 9 **Пивоваров, П. П.** Теоретичні основи харчових технологій : лабораторний практикум / **П. П. Пивоваров, Д. Ю. Прасол, С. П. Пивоваров, А. Б. Горальчук.** – Х. : ХДУХТ. – 2008. – 90 с.
 - 10 **Кондратюк, Н. В.** Технологічні аспекти підвищення біодоступності препаратів, що містять біфідобактерій / **Н. В. Кондратюк, С. П. Пивоваров, С. К. Воцелко, О. П. Неклеса, О. О. Гринченко** // *Мікробіологічний журнал (НАН України).* – 2014. – С. 124-130.
 - 2 **Haschke, F.** Clinical trials prove the safety and efficacy of the probiotic strain Bifidobacterium Bb12 in follow-up formula and growing-up milks / *Monatsschr Kinderhelikd Suppl.* – 1998. – № 1(146). – P. 526-530.
 - 3 **Bregni, C.** Alginate microspheres of Bacillus subtilis / *Ars. Pharmaceutica.* – 2000. – № 41(3). – P. 245-248.
 - 4 **Draget, K. I.** Alginates from Algae. Biosynthesis and Biodegradation / *Wenheim* : Publishing house WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 2005. – 30 p.
 - 5 **Kondratjuk, N. V.** Technology of desserts with the use of the probiotic encapsulated microorganisms / *Kharkiv/* – 2012/ – 19 p.
 - 6 **Sheu, T. Y.** Improving Survival of Culture Bacteria in Frozen Desserts by Microentrapment / *J. Dairy Sci.* – 1993. – № 76. – S. 1902-1907.
 - 7 **Lee, K. Y.** Survival of Bifidobacterium longum Immobilized in Calcium Alginate Beads in Simulated Gastric Juices and Bile Salt Solution / *J. Dairy Sci.* – 2000. – № 66(2). – P. 869-873.
 - 8 **Jung, J. K.** Survival of Double – Microencapsulated Bifidobacterium brm in Milk in Simulated Gastric and Small Intestinal Conditions / *J. Food Sci. Nutr.* – 2007. – № 12. – P. 58-63.
 - 9 **Pyvovarov, P. P., Prasol, D. Y., Pyvovarov, Y. P., Goral'chuk, A. B.** Theoretical Foundations of Food Technology, laboratory practice / *Kharkiv: Publishing house HDUHT.* – 2008. – 90 p.
 - 10 **Kondratjuk, N. V., Pyvovarov Y. P., Vocelko, S. K., Neklesa, O. P.** Technological aspects of improving the bioavailability of drugs containing bifidobacteria / *Microbiological magazine/* – 2014. – P. 124-130.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Derkach, T. M.** Modern nutrition research areas: Training manual / Dnipropetrovs'k, Publishing house DNU. – 2009. – 238 p.

Надійшла (received) 27.06.2015

УДК 664-404.8:664.292: 637.447

**ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В ТЕХНОЛОГИИ СЛАДКИХ ЖЕЛИРОВАННЫХ БЛЮД
НА ОСНОВЕ ПЛОДОВО-ЯГОДНОГО СЫРЬЯ****Т. М. СТЕПАНОВА***Сумской национальный аграрный университет, Сумы, УКРАИНА
email: eshkina97@gmail.com*

АННОТАЦИЯ. Сладкие блюда на основе плодово-ягодного сырья рекомендуются к употреблению различными слоями населения, особенно в период авитаминозов. Среди данной группы особую популярность имеют изделия на основе желатина, владеющие как значительной биологической ценностью, так и высокой энергетической, что влечет за собой определенные ограничения в их использовании в пищевом рационе. Отсюда возникает необходимость балансирования между ценностями готового продукта, что обуславливает поиск технологических решений. Создание стойкого научно обоснованного информационного поля в использовании менее энергоемкого и более ценного в технологическом и физиологическом отношении сырья - низкоэтерифицированного амидированного пектина, наряду с порошком яичной скорлупы в качестве источника биоактивного кальция, позволит решить одну из существующих социальных проблем современности – неправильного питания, обусловленного дисбалансом пищевого рациона человека.

Ключевые слова: инновация, низкоэтерифицированный амидированный пектин, студнеобразование, порошок яичной скорлупы, сладкие блюда.

АННОТАЦИЯ. Солодкі страви на основі плодово-ягідної сировини рекомендується споживати різним верствам населення, особливо у сезони авітамінозів. Серед даної групи особливо популярними є вироби на основі желатину, які мають як значну біологічну цінність, так і високу енергетичну, що призводить до деяких обмежень їх використання у харчовому раціоні. Звідси виникає необхідність балансування між цінностями готового продукту, що призводить до пошуку технологічних рішень. Створення стійкого науково обгрунтованого інформаційного поля щодо використання мени енергомісткої та більш цінної у технологічному та фізіологічному плані сировини, зокрема низькоетерифікованого амідованого пектину, разом із порошком яєчної шкаралупи, як джерела біоактивного кальцію, дозволить вирішити одну із існуючих соціальних проблем сучасності – неправильного харчування, зумовленого розбалансованістю раціону людини.

Ключові слова: інновація, низькоетерифікований амідований пектин, драглеутворення, порошок яєчної шкаралупи, солодкі страви.

**INNOVATIVE IDEAS IN TECHNOLOGY GELLED SWEET DISHES BASED ON
FRUIT AND BERRIES RAW MATERIALS****T. STEPANOVA***Sумы National Agrarian University, Sумы, UKRAINE*

ABSTRACT High levels of biological and physiological values are regulatory factors of the growing popularity gelled desserts among the population.

However, these products are high in calories and have number of restrictions at the using.

To prevent this developed the technology of jelly forming semi-finished product for jelly products, based on low-esterified amidation pectin. The innovation strategy of products, based on this semi-finished product was determined. It is the low calorie sweet dishes creation with the maximum preservation of biological and physiological values.

This will expand the range of dessert jelly products, such as, jelly, mousse, sambuc, cream etc.

At the article analyzed the scientific research in the area of pectin based jelly products creation. The information field was forming and scientifically justified according to the results of an analytical study. It contains of the basic technological criteria of different types of pectin. The efficiency of pectin participation at the food composition with biological activity egg-shells powder calcium creation was determined.

The innovation strategy based on the human rational nutrition principles and on the micronutrient and calorie balanced creation necessity. The result of innovation is aimed at the solving of modern social problem prevention of diseases related to malnutrition.

Thus, conversance the population of the new approaches in the low-calorie dessert products based on pectin creation predictably would contribute to the development and promotion of a balanced diet will allow a wide range of customers.

Keywords: innovation, low-esterified amidated pectin, gelation, egg shell powder, dessert.

Введение

Пищевые продукты на основе плодово-ягодного сырья рекомендуются к употреблению

различным слоям населения, особенно в период авитаминозов. Среди данной группы особой популярностью пользуются сладкие блюда на основе желатина. Не смотря на то, что данная продукция

характеризуется высокой биологической ценностью, следует отметить ее высокую калорийность. Такой факт, безусловно, ограничивает потребление данной продукции, особенно лицами с нарушениями обменных процессов.

Статистика свидетельствует о том, что на сегодняшний день преимущественное большинство украинского населения (особенно дети) нуждаются в сбалансированности пищевого рациона, поскольку чрезмерное «обшение» подрастающего поколения с источниками информации и связи, все больше вытесняют из их жизни привычные физические нагрузки и двигательную активность, приводя к неутешительным последствиям: сахарному диабету, ожирению, сердечнососудистым заболеваниям, нарушению процесса утилизации из организма продуктов метаболизма [1].

Таким образом, информатизация населения о новых подходах в разработке технологий сладких желеобразованных блюд на основе плодово-ягодного сырья, сбалансированных по энергетической, биологической и физиологической ценностям, позволит улучшить качество питания людей разных возрастов и уровней дохода.

Цель работы

Разработка инновационной стратегии создания кулинарной продукции на основе полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд.

Изложение основного материала

На сегодняшний день одним из средств регулирования пищевого рациона человека является потребление низкокалорийных продуктов, содержащих повышенное количество биологически активных компонентов – пищевых волокон, витаминно-минеральных комплексов, эссенциальных веществ и т.п. К сожалению, такие пищевые композиции в естественном виде практически не существуют, поэтому, инновации в данном направлении станут полезными для многих людей.

В последнее время преимущественным спросом пользуются десерты на основе кисломолочной продукции и плодово-ягодные желе. Желе имеют более приятный внешний вид, высокие органолептические показатели, широкий ассортимент, а также являются продуктами с высокой пищевой и биологической ценностью. Однако, следует отметить и высокую калорийность, которая образуется в результате усвоения белковой составляющей (желатина) и углеводной (сахара). Последний отвечает за основной органолептический показатель готового продукта – вкус, поэтому инновации в этом направлении возможны только в случае использования дорогостоящих заменителей. Таким образом, поиск эффективных технологий должен основываться на подборе веществ, имеющих высокую

студнеобразующую способность и низкую энергетическую ценность. Кроме того, следует учитывать особенности их химического состава, изменение свойств в пищевых системах и условия использования.

Этим вопросам посвящены работы отечественных и зарубежных ученых Пивоварова П. П. [2], Гринченко О. А. [3], Перцевого Ф. В. [4], DeVries J. W. [5], Seymour B. G. [6] и др.

Дудкин М. С. [7], Ардатская М. Д. [8], изучая физиологическое действие студнеобразователей полисахаридной природы (неусвояемых сахаров) установили, что они являются субстратом для полезных бактерий микрофлоры кишечника. Таким образом, была определена основная функция студнеобразующих компонентов полисахаридной природы на организм человека.

Значительное внимание в информационном потоке по данному вопросу посвящено пектинам – гетерополимерам с высокой молекулярной массой, основу которых (60 %) составляют остатки галактуроновой кислоты. Кислотная группа может быть свободной, в виде простой соли (натрия, калия, кальция, аммония) или природно этерифицирована метанолом [9].

Согласно хронологии изучения структуры пектиновых веществ и их свойств в качестве пищевого модуля стало известно, что в 1790 году французский химик Ваклен Л. Н. впервые выделил из фруктового сока водорастворимое вещество, способное к гелеобразованию [10]. Однако, только в 1825 году другой французский химик Г. Браконно детально изучил и дал определение данному веществу – пектиновая кислота (греч. «pektos» – застывший) [11]. В 1924 г. чешский химик Смоленски К. впервые заявил, что пектин имеет вид полимерной цепи, состоящей из остатков D-галактуроновой кислоты, соединенных между собой α -1,4-гликозидной связью [12]. В 1930 году Майер К. Г. и Марк Х. Ф. экспериментально подтвердили это предположение, проведя рентгеновское исследование [13]. И уже в 1937 году немецкие ученые Д. Шнайдер и И. Бокк установили структурную формулу пектина (рис. 1) [14].

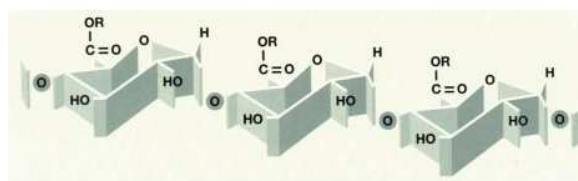


Рис. 1 – Структурная формула пектина

Многие ученые исследовали химическую структуру и свойства данного полисахарида [15]. Достижения в этой области представлены в виде классификационной схемы (рис. 2).

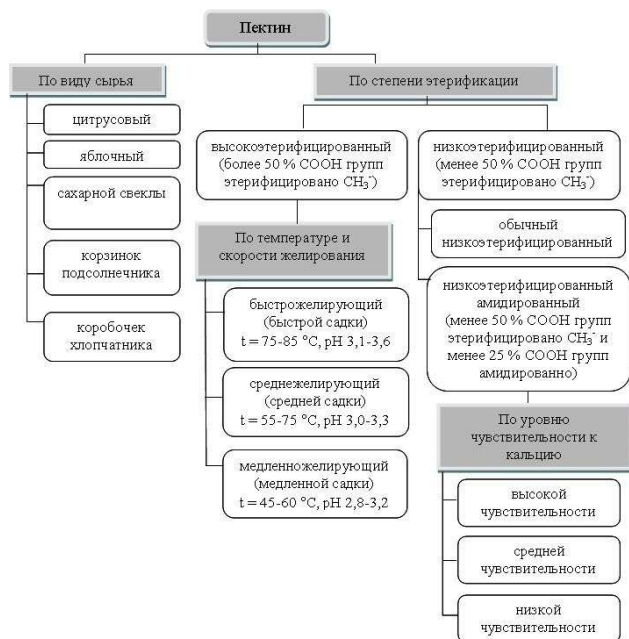


Рис. 2 – Классификация пектина

Особенно интересными для создания инноваций в области технологии кулинарной продукции стали результаты изучения функций пектина как структурообразователя. Так, авторы [16] получили желе на основе пектина и морковного сока. Продукт содержит большое количество природных каротиноидов. К сожалению, в описании отсутствует информация об органолептических свойствах готового продукта, что было бы крайне полезным для привлечения потребителей и производителей.

Дальнейший поиск информации о разработках желированных продуктов на основе пектина привел к результатам исследований, описанных в работах [17, 18]. В работе [17] предлагается способ производства желейного продукта на основе яблочно-пектинового концентрата с добавлением пюре из плодов калины, актинии, хеномелиса, облепихи, лимонника, дерна, бузины, обладающих лечебными свойствами. Разработчики обращают внимание на то, что антимуtagenные свойства пектина выступят удачным дополнением к комплексу антоцианов, фенольных соединений и других биологически активных веществ, содержащихся в полезных ягодах. Согласно описанию другого способа производства продукта на основе натуральных соков и пюре из ягод и овощей [18] стало известно о возможности использования облепихи, клюквы и жимолости, а также мякоти тыквы и столовой свеклы для получения продуктов с железной пектиновой основой. Следует подчеркнуть полифункциональность данных продуктов для организма человека, но также следует отметить, что сырьевая база разработок характеризуется сезонностью, что может отрицательно отразиться на экономической эффективности технологии и себестоимости готового продукта.

Авторами [19] была предложена пищевая фруктовая композиция – гель на основе низкоэтерифицированного амидированного пектина, образовавшийся в ходе химической реакции с ионами кальция. Композиция достаточно устойчива к синерезису, не перегружена содержанием простых сахаров, что позволяет судить о статусе низкокалорийного продукта. Отмечается физиологическое действие фруктовой составляющей. К сожалению, в описании недостаточно охарактеризована особенность взаимодействия рецептурных компонентов и условия протекания реакции структурообразования.

Таким образом, исходя из результатов анализа информационных источников, подтверждается поиск технологических решений в направлении использования пектина для создания низкокалорийных продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью. Также отмечается проблемность создания продуктов, обладающих полифункциональными свойствами. На основании вышесказанного можно отметить целесообразность инноваций в технологии сладких желированных блюд на плодово-ягодном сырье с использованием пектина, что, в свою очередь, диктует необходимость создания информационного поля для научно-технического творчества в рамках создания современных технологий низкокалорийной желированной продукции.

Обсуждение результатов

На сегодняшний день, каждая разработка новой технологии должна иметь в основе четко прописанный план ее создания, который должен содержать следующие составляющие: сущность инновации, характер разрабатываемой технологии и характер рынка [20]. В работе [21] обобщена существующая информация о химической активности пектинов, в частности, описана роль низкоэтерифицированного амидированного пектина в формировании свойств гелевых систем при участии ионов кальция, полученных путем кислотного гидролиза из порошка яичной скорлупы. В работе [22] описывается процесс ионотропного гелеобразования между карбоксильными группами низкоэтерифицированного амидированного пектина и свободными ионами кальция, который завершается формированием устойчивых хелатных комплексов с дальнейшим получением термостабильных гелей с заданными структурно-механическими свойствами.

Разработка технологии полуфабрикатов с расширенным спектром физиологических и технологических функций предполагает развитие радикального типа инноваций, что в нынешних условиях является целесообразным и определяет содержание и распространяемость технологических систем.

Таким образом, радикализация инноваций определяет требования к характеру технологий и выделяет факторы стратегии (табл.1), которые способствуют выведению продукции на существующий рынок и благоприятствуют вхождению в новые [23].

Таблица 1 – Факторы инновационной стратегии

Факторы инновации			Степень влияния факторов		
Организация	Технология	Рынок	организация	технология	рынок
Постепенная	типовая	существующий	+	+	++
	усовершенствованная	существующий	+++	+	+++
	принципиально новая	новый	++	+++	++
Радикальная	усовершенствованная	существующий	++	+++	++
	принципиально новая	новый	++	+++	++

Примечание: «+» - менее важный; «++» - важный; «+++» - наиболее важный

Значимость технологического фактора определяется с позиции «наиболее важный» и требует существенной детализации.

Инновационная стратегия данного исследования предусматривает разработку технологии кулинарной продукции на основе полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд, что предусматривает создание новой десертной продукции, имеющей, по сравнению с традиционными аналогами, определенные конкурентные преимущества. Новый продукт поможет сбалансировать пищевой рацион пектиносодержащей продукцией, обогащенной источником биоактивного кальция, а разработанная технология максимально адаптирована к существующему технологическому потоку.

Технология кулинарной продукции на основе полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд разрабатывается с учетом инноваций в области производства структурированной пищевой продукции, реализуя методы ионотропного гелеобразования, обособленные параметры протекания которого дадут возможность формирования необходимых физико-химических, структурно-механических, органолептических показателей и пищевой ценности нового продукта.

При определенных условиях в новой технологии является целесообразным использование низкоэтерифицированного амидированного пектина и

порошка яичной скорлупы ультрамелкого помола, как источника ионов Ca^{2+} .

Все это стало предпосылками к определению инновационного замысла нового продукта – полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд (табл. 2).

Таблица 2 – Инновационная идея нового продукта

Показатель	Характеристика
Наименование продукта	Полуфабрикаты студнеобразующие для сладких блюд (ПССБ)
Концепция продукта	В основе ПССБ лежит обогащение сладких блюд полезными нутриентами, что способствует улучшению органолептических показателей, повышению пищевой и биологической ценности. ПССБ являются полуфабрикатами высокой степени готовности, технологические свойства которых позволяют использовать их в качестве основы для сладких желированных блюд
Целевой сегмент	Для использования широким кругом потребителей
Конкурентные преимущества	Продукт полифункционального назначения, имеет длительный срок хранения
Прогнозируемая розничная цена	62... 64 грн. за 1 кг
Органолептические показатели продукта	ПССБ имеют однородную сыпучую консистенцию. Цвет – свойственный полуфабрикатам, равномерный по всей поверхности, вкус и запах – чистые.
Масса продукта	От 0,05 кг до 1,0 кг (в зависимости от технологического назначения)
Ассортимент	Формируется за счет вариативных внесений основных компонентов
Сроки хранения	Длительные

Продукт прошел апробацию и получил высокие оценки в ряде выставок Харьковского государственного университета питания и торговли. Вопросы внедрения данного продукта на рынке были освещены в ряде публикаций и на конференциях. По результатам научных разработок создан проект нормативной документации – ТУ «Полуфабрикаты студнеобразующие для сладких блюд» и произведены опытно-промышленные партии продукта в ряде отечественных предприятий.

Выводы

Таким образом, созданное информационное поле позволяет разработать технологию кулинарной продукции на основе полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд с участием низкоэтерифицированного амидированного пектина, порошка яичной скорлупы ультрамелкого помола, как источника биоактивного кальция, а также лимонной кислоты и сахара.

Реализация инновационного замысла нового продукта позволяет определить внедрение его на рынке, путем выгодного позиционирования среди прочих видов десертной продукции.

Информация, представленная в статье, позволяет расширить возможности использования пектина низкоэтерифицированного амидированного в составе полуфабрикатов студнеобразующих для сладких блюд с последующим получением новой продукции – желе, муссов, самбуков, кремов, способствующих балансу пищевых рационов.

Список литературы

1. **Smith, A. L.** Youth perceptions of how neighborhood physical environment and peers affect physical activity: a focus group study / **A. L. Smith, Ph. J. Troped, M. H. McDonough, J. D. DeFreez** // *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. – 2015. – № 12. – P. 103-121.
2. **Пивоваров, П. П.** Інноваційні технології виробництва харчової продукції масового споживання / **П. П. Пивоваров, О. О. Гринченко, В. М. Михайлов, С. В. Иванов, А. А. Коваленко, Є. П. Пивоваров, В. В. Зайцев, Ю. Г. Абсаямов, А. В. Зайцев, М. О. Янчева.** – Харків: ХДУХТ. – 2011. – 444 с.
3. **Гринченко, О. О.** Теоретичні та прикладні аспекти стабілізації харчових продуктів з гетерогенною структурою / **О. О. Гринченко, П. П. Пивоваров, В. М. Михайлов, М. І. Погожих, М. О. Янчева, А. В. Зайцев, Н. Г. Гринченко.** – Харків: ХДУХТ. – 2010. – 253 с.
4. **Перцевой, Ф. В.** Дослідження структуроутворення та змін форми зв'язку вологи в пектинових гелях методом диференціально-сканувальної калориметрії / **Ф. В. Перцевой, І. О. Крапивницька, В. О. Потапов, П. В. Гурський** // *Восточно-Европейский журнал передових технологій*. – 2015. – 1/6 (73). – С. 48-52.
5. **DeVries, J. W.** A historical perspective on defining dietary fibre / **J. W. DeVries, L. Prosky, B. Li, S. Cho** // *Cereal foods world*. – 1999. – № 44. – P. 367-369.
6. **Seymour, B. G.** Pectin and their Manipulation / **B. G. Seymour, R. J. Hamilton, J. P. Knox** // London: Wiley. – 2002. – P. 264.
7. **Дудкин, М. С.** Новые продукты питания / **М. С. Дудкин, Л. Ф. Щелкунов.** – М.: МАИК "Наука". – 1998. – 304 с.
8. **Ардатская, М. Д.** Клиническое применение пищевых волокон / **М. Д. Ардатская.** – М.: 4ТЕ Арт. – 2010. – 48 с.
9. **Phillips, G. O.** Handbook of hydrocolloids / **G. O. Phillips, P. A. Williams.** – New York : CRC Press. – 2009. – 1003 p.
10. **Wisniak, J. Louis-Nicolas Vaquelin / J. Wisniak** // *Revista CENIC Ciencias Quimicas*. – 2003. – № 1. – P. 47-54.
11. **Georgiev, Y.** Isolation, characterization and modification of citrus pectins / **Y. Georgiev, M. Ognyanov, I. Yanakieva, V. Kussovski, M. Kratchanova** // *J. BioSci. Biotech.* – 2012. – №1. – P. 223-233.
12. **Verrijssen, T. A.** The effect of pectin on *in vitro* β -carotene bioaccessibility and lipid digestion in low fat emulsions / **T. A. Verrijssen, S. H. Varkempinck, S. Christiaens, A. M. Van Loey, M.E. Hendrickx** // *Food Hydrocolloids*. – 2015. – № 49. – P. 73-81.
13. **Tanhatan-Nasseri, A.** Citrus pectin structure and application in acid dairy drinks / **A. Tanhatan-Nasseri, J. F. Thibault, M. Ch. Ralet** // *Tree and forestry science and biotechnology*. – 2008. – № 2. – P. 60-70.
14. **Sungsoo, S. C.** Fiber ingredients. Food applications and health benefit / **S. C. Sungsoo, P. Samuel.** – London : CRC Press. – 2009 – 514 p.
15. **Донченко, Л. В.** Пектин: основные свойства, производство и применение / **Л. В. Донченко, Г. Г. Фирсов.** – М: ДеЛи принт. – 2007. – 276 с.
16. **Пат. 55071 Україна, МПК А23L 1/06** Морквяне желе / **Г. М. Бандуренко, Т. М. Левківська** ; Заявн. НУХТ. - № 201004332 ; заявл. 14.04.10; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23.
17. **Пат. 85803 Україна, МПК А23L 1/06** Желейний продукт / **І. О. Крапивницька, Н. І. Джуренко, О. П. Паламарчук, Г. М. Бандуренко, Н. В. Скрипченко, Є. О. Омельчук** ; Заявн. НУХТ. - № 200802506 ; заявл. 26.02.08; опубл. 25.02.09, Бюл. № 4.
18. **Мацейчик, И. В.** Разработка технологии и рецептур желированных масс функционального назначения / **И. В. Мацейчик, И. О. Ломовский, С. М. Корпачева** // *Вестник КрасГАУ.* – 2014. – № 7. – С. 190-195.
19. **Пат. 2385626 Российская Федерация, МПК А23L1/06** Гелеобразующий агент, включающий комбинацию пектинов, для низкокалорийных гелей / **А. Б Тегерсен, С. Х. Кристенсен**; Заявит. КП КЕЛЬКО АПС. - № 2007117731/13; заявл. 12.10.05; опубл. 10.04.10, Бюл. № 8.
20. **Earle, M.** Food Products Development / **M. Earle, R. Earle, A. Anderson.** – Oxford: Woodhead Publishing. – 2001. – 392 p.
21. **Kondratjuk, N.** Modelling of low calorie pectin-based product composition / **N. Kondratjuk, T. Stepanova, P. Pyvovarov, Y. Pyvovarov** // *Ukrainian Food Journal*. – 2015. – № 4 – P. 22-36.
22. **Кондратюк, Н. В.** Вивчення особливостей драглеутворення в системі «NEA pectin-Ca²⁺» / **Н. В. Кондратюк, Т. М. Степанова, О. В. Дубовик** // *Міжнар. наук.-практ. конф. Актуальні пробл. та персп. розвитку харч. виробництв, гот.-рестор. та турист. бізнесу.* – Полтава : ВНЗ Укоопспілки «ПУЕТ». – 2014. – С. 32-34.
23. **West, J.** Getting clear about communities in open innovation / **J. West, K. Lakhani** // *Industry and Innovation*. – 2008. – №15. – P. 223-228.

Bibliography (transliterated)

1. **Smith, A. L., Troped, Ph. J., McDonough, M. H. & DeFreez, J. D.** Youth perceptions of how neighborhood physical environment and peers affect physical activity: a focus group study, *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. – 2015. – № 12. – P. 103-121.
2. **Pyvovarov, P. P., Grynchenko, O. O., Mykhailov, V. M., Ivanov, S. V., Kovalenko, A. A., Pyvovarov, Y. P.,**

- Zaytcev, V. V., Absaliyev, Y. G., Zaytcev, A. V. & Yancheva, M. O. // *The innovative technology of mass consumption food products*, Kharkiv: Publishing house HDUHT. – 2011. – 444 p.
3. Grynchenko, O. O., Pyvovarov, P. P., Mykhailov, V. M., Pogozhii, M. I., Yancheva, M. O., Zaytcev, A. V. & Grynchenko, N. G. Theoretical and applied aspects of food stabilization of heterogeneous structure. – Kharkiv: Publishing house HDUHT. – 2010. – 253 s.
 4. Percevoi, F. V., Krapivnyts'ka, I. O., Potapov, V. O. & Gurs'kyi, P. V. The study of structure and changes shape due to moisture pectin gels by differential-scanning calorimetry // *East European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – № 1/6 (73). – P. 48-52.
 5. DeVries, J. W., Prosky, L., Li, B. & Cho, S. A historical perspective on defining dietary fibre / *Cereal foods world*. – 1999. – № 44. – P. 367-369.
 6. Seymour, B. G., Hamilton, R. J. & Knox, J. P. Pectin and their Manipulation. – London: Publishing house Wiley. – 2002. – 264 p.
 7. Dudkyn, M. S. & Shhelkunov, L. F. New food products. – Moscow: Publishing house MAIK "Nauka". – 1998. – 304 p.
 8. Ardatskaya, M. D. The clinical using of food fiber. – Moscow: Publishing house 4TE Art. – 2010. – 48 p.
 9. Phillips, G. O. & Williams, P. A. Handbook of hydrocolloids. – New York: CRC Press. – 2009. – 1003 p.
 10. Wisniak, J. Louis-Nicolas Vaquelin / *Revista CENIC Ciencias Quimicas*. – 2003. – № 1. – P. 47-54.
 11. Georgiev, Y., Ognyanov, M., Yanakieva, I., Kussovski, V. & Kratchanova, M. Isolation, characterization and modification of citrus pectins / *J. BioSci. Biotech*. – 2012. – № 1. – P. 223-233.
 12. Verrijssen, T. A., Varkempinck, S. H., Christiaens, S., Van Loey, A. M. & Hendrickx, M. E. The effect of pectin on *in vitro* β -carotene bioaccessibility and lipid digestion in low fat emulsions / *Food Hydrocolloids*. – 2015. – № 49. – P. 73-81.
 13. Tanhatan-Nasseri, A., Thibault, J. F. & Ralet, M. Ch. Citrus pectin structure and application in acid dairy drinks / *Tree and forestry science and biotechnology*. – 2008. – № 2. – P. 60-70.
 14. Sungsoo, S. C. & Samuel, P. Fiber ingredients. Food applications and health benefit. – London: CRC Press. – 2009. – 514 p.
 15. Donchenko, L. V. & Firsov, G. G., Pectin: basic properties, production and using. – Moscow: DeLi print. – 2007. – 276 p.
 16. Bandurenko, G. M. & Levkivs'ka, T. M. 2010. Ukr. Patent №. 55071
 17. Krapivnyts'ka, I. O., Dzhurenko, N. I., Palamarchuk, O. P., Bandurenko, G. M., Skrypchenko, N. V. & Omel'chuk, Je. O. 2009. Ukr. Patent №. 85803.
 18. Macejchik, I. V., Lomovskij, I. O. & Korpacheva, S. M. Development of technology and formulations gelled functionality masses / *Vestnik KrasGAU*. – 2014. – № 7. – P. 190-195.
 19. Tegersen, A. B. & Christensen, S. Ch. 2010. Rus. Patent № 2385626.
 20. Earle, M., Earle, R. & Anderson, A. Food Products Development. – Oxford: Woodhead Publishing. – 2001. – 392 p.
 21. Kondratjuk, N., Stepanova, T. Pyvovarov, P. & Pyvovarov, Y. Modelling of low calorie pectin-based product composition / *Ukrainian Food Journal*. – 2015. – № 4. – P. 22-36.
 22. Kondratiuk, N. V., Stepanova, T. M., & Dubovik, O. V. Study the features of jellation in system «NEA pectin-Ca²⁺» / *International Research and Practice conference "Actual problems and prospects of food production, hotel and restaurant and tourism business"*, Poltava: Publishing house VNZ Ukoopspilky «PUET». – 2014. – P. 32-34.
 23. West, J. & Lakhani, K. Getting clear about communities in open innovation / *Industry and Innovation*. – 2008. – № 15. – P. 223-228.

Поступила (received) 30.05.2015

УДК 577.352.3:612.111.3

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОДЕРЖАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ГЕМОГЛОБИНА**Н. Н. ТИМЧЕНКО^{1*}, В. А. РУБАКИНА², М. П. ЕВСТИГНЕЕВ², С. Н. ЛАВРИНЕНКО³**¹ Харьковський національний технічний університет сільськогосподарського господарства ім. П. Василенко, Харків² Севастопольський державний університет, Севастополь³ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*email: timchenko_n@list.ru

АННОТАЦИЯ Досліджено вплив температури в області +4-+38°C на спектроскопічні властивості гемоглобіну в розчинах гемолізату при різних термінах зберігання гемолізату. Визначено вміст різних форм гемоглобіну (окси-, дезокси- і метгемоглобіну) в розчині гемолізату при різних температурах в залежності від термінів зберігання. Встановлено, що при збільшенні терміну зберігання від 1 до 7 діб в розчині гемолізату зменшується вміст оксигемоглобіну і збільшується вміст дезокси- і метгемоглобіну.

Ключові слова: гемолізат, температура, оксигемоглобін, дезоксигемоглобін, метгемоглобін

АННОТАЦИЯ Исследовано влияние температуры в области +4-+38°C на спектроскопические свойства гемоглобина в растворах гемолизата при различных сроках хранения гемолизата. Определено содержание различных форм гемоглобина (окси-, дезокси- и метгемоглобина) в растворе гемолизата при различных температурах в зависимости от сроков хранения. Установлено, что при увеличении срока хранения от 1 до 7 дней в растворе гемолизата уменьшается содержание оксигемоглобина и увеличивается содержание дезокси- и метгемоглобина.

Ключевые слова: гемолизат, температура, оксигемоглобин, дезоксигемоглобин, метгемоглобин

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE CONTENTS OF DIFFERENT FORMS OF HEMOGLOBIN**N. N. TIMCHENKO¹, V. A. RUBAKINA², M. P. EVSTIGNEEV², S. N. LAVRINENKO³**¹ Kharkiv Petro Vasylenko national technical university of agriculture, Kharkov² Sevastopol State University, Sevastopol³ National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov

ABSTRACT The purpose of investigation is studying of temperature influence in the range of +4-+38°C on the hemoglobin spectroscopic properties in hemolysate solutions of different storage terms at +4°C and determining of different forms of hemoglobin contents (oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin and methemoglobin). Hemolysate solutions from 1 to 7 days of storage at +4°C were investigated. Different forms of hemoglobin contents (oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin and methemoglobin) was determined by special formulas using values of absorbance spectra intensity of hemoglobin at definite wave lengths. There is a quantity of oxyhemoglobin in the hemolysate solution which decreased on the whole as compared to hemolysate of 1 day of storage at increasing of hemolysate solutions storage terms from 1 to 7 days. Thus in control at +4°C the contents of oxyhemoglobin in hemolysate solution of 7 days of storage was less as compared to the contents of oxyhemoglobin in hemolysate solution at +4°C of 1 day of storage. Also the contents of deoxyhemoglobin and methemoglobin in hemolysate solution at 4°C of 7 days of storage was increased. It is possible to associate with the fact that erythrocyte membranes are separated from cells and do not carrying out their save function in hemolysate solutions. It is possible that increase of hemolysate storage terms decrease ability of hemoglobin to binding of oxygen at temperature higher than +20°C. Also these facts can be connected with peculiarity of erythrocytes of donors from which hemolysate solutions were obtained.

Keywords: hemolysate, temperature, oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, methemoglobin

Введение

Изучение влияния различных факторов на процесс связывания кислорода гемоглобином является очень важным с точки зрения понимания того, как эритроциты осуществляют газотранспортную функцию. В настоящее время в мировой литературе представлены данные исследований кровезаменителей на основе

гемоглобина. Одним из факторов, влияющих на содержание различных форм гемоглобина, является температура. Содержание различных форм гемоглобина может быть определено спектрофотометрическим методом. Спектрофотометрический метод измерения поглощения света состоит в регистрации спектра поглощения веществ. Оптический спектр представляет собой зависимость параметра,

описывающего распределение интенсивности или вероятности поглощения или излучения от длины волны или волнового числа. В данной работе анализировали спектры поглощения гемоглобина в области 450-700 нм.

Цель работы

Целью работы является исследование влияния температуры в области $+4$ – $+38^{\circ}\text{C}$ на спектроскопические свойства гемоглобина в растворах гемолизата различных сроков хранения и определение содержания различных форм гемоглобина (оксигемоглобина, дезоксигемоглобина и метгемоглобина) в растворе гемолизата. Исследовали растворы гемолизата от 1 до 7 дней хранения при $+4^{\circ}\text{C}$.

Изложение основного материала

Эритроциты осаждали путем трёхкратного центрифугирования в течение 10 минут при 1500 g донорской крови и физиологического раствора в объемном соотношении 1:10. Гемолизат получали путем добавления одного объема дистиллированной воды и хранения 24 часа при $+4^{\circ}\text{C}$.

Для определения содержания различных форм гемоглобина в растворе гемолизата записывали спектры поглощения гемоглобина на спектрофотометре, измеряли интенсивность поглощения гемоглобина на определенных длинах волн, использовали формулы, описанные в [1].

Содержание различных форм гемоглобина (окси-, дезокси- и метгемоглобина) связано с газотранспортной функцией эритроцитов. О газотранспортной, или дыхательной функции эритроцитов судят по емкости, насыщению и средству. Транспортируемые в нормальных условиях дыхания газы – это кислород экзогенного происхождения, оксид углерода (IV) и оксид углерода (II) – эндогенного. Термином емкость определяют способность крови, эритроцитов и гемоглобина связывать максимальное количество этих газов, поэтому емкость зависит от содержания эритроцитов и гемоглобина в крови. Реальное использование этой возможности связано с рядом условий и определяется термином насыщение. Емкость реализуется через средство эритроцитов и гемоглобина к молекулам газов, оно зависит от структуры (типа) гемоглобина и физико-химических особенностей среды внутри эритроцита.

Газотранспортная функция эритроцитов, подобно любой другой функции организма, развивается постепенно, претерпевая сложные возрастные изменения, масштабы которых зависят от видовых, экологических особенностей организма. В процессе формирования представления о развитии

газотранспортной функции в онтогенезе накоплены материалы о возрастной динамике таких показателей, как содержание эритроцитов и гемоглобина в крови, объем крови, размеры клеток, т.е. всего того, что определяют как физиологические характеристики. Изучаются вопросы, связанные с влиянием эритроцитов на средство гемоглобина к кислороду, степени насыщения эритроцитов кислородом в разном возрасте и рядом других функциональных показателей, ролью органических фосфатов, содержащихся в эритроцитах, как специфических модификаторов свойств гемоглобина.

В раннем онтогенезе динамика состава популяции эритроцитов сложнее, чем в зрелом возрасте, потому что собственное созревание эритроидных клеток модифицируется в зависимости от созревания всего организма. Основой этой модификации служит меняющаяся с возрастом локализация эритропоэза. В результате меняется суммарный состав клеток, создавая картину динамического поведения ткани. Вклад различных групп эритроцитов в оксигенацию и газотранспортную функцию не одинаков. Изменение морфологии клеток крови сопровождается перестройкой физико-химических свойств и устойчивости к гемолитикам. Клетки крови плода проявляют повышенную устойчивость к гемолитикам. У всех позвоночных изменение локализации эритропоэза и переход от мегалобластического к нормобластическому типу приводят к тому, что состав циркулирующей крови растущего плода все более отличается от клеточного состава кроветворной ткани. Газотранспортную функцию выполняют клетки, все более зрелые и однородные по величине и физико-химическим свойствам. Дефинитивный характер клеток проявляется тем в большей степени, чем более зрелым к моменту рождения должен быть организм. Эритроциты одной популяции отличаются друг от друга соотношением разных типов гемоглобина, вследствие этого разные эритроциты обладают неодинаковыми возможностями для выполнения газотранспортной функции. На эти различия влияют величина средства различных гемоглобинов к кислороду и отношение их к действию внутриэритроцитарных факторов — pH, органических фосфатов.

Основной функцией гемоглобина, входящего в состав эритроцитов, является транспорт кислорода из легких животного во внутренние органы и обратный – углекислого газа [2]. Гемоглобин состоит из двух пар миоглобин-подобных субъединиц. Четыре субъединицы вместе образуют почти правильный тетраэдр. Молекула кислорода присоединяется к гемам, используя шестую координационную связь Fe^{2+} так же как и в случае миоглобина. В связывании углекислого газа участвуют свободные α -аминогруппы N-концов гемоглобина [3].

Внутри тетрамера существует полость, пронизывающая всю молекулу на 5 нм по ее высоте.

Полость выглядит как две коробки, поставленные друг на друга и повернутые перпендикулярно друг другу. Высота каждой около 2,5 нм, длина – 2,0, ширина – 0,8-1,0. Ширина коробок соответствует расстоянию между идентичными субъединицами. Полость формируется главным образом неполярными остатками [4].

Методом рентгеноструктурного анализа высокого разрешения идентифицировано расположение молекул воды, наиболее прочно связанных с деокси- и метформой гемоглобина [5]. Некоторое количество молекул воды локализовано в области контактов между субъединицами и образует мостиковые связи, дополнительно стабилизируя тетрамер.

Много молекул воды на поверхности субъединиц зарегистрировано вблизи полярных групп субъединиц гемоглобина [6]. На картах электронной плотности гемоглобина всего зарегистрировано только 90 молекул воды. Это составляет 10% от гидратной оболочки гемоглобина. Остальная часть обладает большей подвижностью и не может быть зарегистрирована рентгеноструктурным методом. Процесс присоединения кислорода тетрамером гемоглобина носит кооперативный характер. Кооперативность в данном случае означает, что присоединение первых молекул кислорода к гемоглобину облегчает присоединение остальных молекул кислорода. Гемоглобин можно рассматривать как белок, моделирующий аллостерические свойства ферментов. В результате подведения итогов серии рентгеноструктурных исследований предложен стереохимический механизм гем-гемового взаимодействия [7]. При переходе гемоглобина из окси- в деоксиформу наиболее значительно изменяется четвертичная структура белка. Пусковым механизмом этих изменений является перемещение атома железа на 0,075 нм относительно плоскости порфиринового кольца одной из субъединиц при связывании в шестом положении Fe (II) молекулы O₂. Fe (II) при этом переходит из высоко- в низкоспиновое состояние и располагается в плоскости гема. Атом железа как бы “подтягивает” к гему проксимальный остаток гистидина. Это вызывает перемещение спирали к центру молекулы и вытеснение ТирС2(140) из полости между спиралями. Дальнейшие события приводят к поэтапному разрыву солевых мостиков, стабилизирующих четвертичную структуру деоксиформы гемоглобина, и переходу гемоглобина в оксиформу. Переход гемоглобина из деокси- в оксиформу сопровождается разрывом шести солевых мостиков и освобождением протонов (эффект Бора). Этот процесс характеризуется уменьшением энергии взаимодействия между субъединицами на 25-50 кДж/моль.

Поскольку содержание различных форм гемоглобина связано с газотранспортной функцией эритроцитов, важно исследовать влияние на этот показатель температуры, как фактора, действующего

на состояние организма. В настоящем исследовании при рассмотрении влияния температуры на содержание различных форм гемоглобина (окси-, дезокси- и метгемоглобина) в растворах гемолизата при различных сроках хранения было определено, что содержание оксигемоглобина уменьшается при увеличении температуры от +4°C до +38°C и происходит увеличение содержания дезокси- и метгемоглобина. Значительное уменьшение содержания оксигемоглобина происходит после повышения температуры от +20°C до +38°C. При повышении температуры от +4°C до +20°C содержание оксигемоглобина понижается на 6%, а после дальнейшего увеличения температуры до +38°C уменьшается на 18%. При увеличении сроков хранения гемолизата от 1 до 7 дней количество оксигемоглобина в растворе гемолизата 7 дней хранения уменьшилось в целом по сравнению с количеством оксигемоглобина в растворе гемолизата 1 дня хранения.

Обсуждение результатов

Температура является фактором, который может оказывать влияние на состояние гемоглобина [8]. В работе [9] было исследовано влияние температуры на состояние внутриэритроцитарного гемоглобина, т.е. гемоглобина, находящегося в клетке – в эритроците. В настоящей работе предметом исследования было состояние гемоглобина в растворах гемолизатов различных сроков хранения при действии температур в диапазоне +4-+38°C. Гемолизат представляет собой массу гемолизированных (разрушенных) эритроцитов, которые, находясь не в физиологическом растворе, а в дистиллированной воде, лопнули, мембраны эритроцитов («тени») разрушились, отделились от клетки, гемоглобин вышел во внешнюю среду. Таким образом в гемолизате присутствуют и гемоглобин, и мембраны эритроцитов, но они уже существуют не в составе клетки, а вышли из неё. В работе [9] отмечается, что в зависимости от донора и сроков хранения эритроцитовой массы влияние температуры на содержание различных форм внутриэритроцитарного гемоглобина (окси-, дезокси- и метгемоглобина) имеет особенности. Происходит уменьшение содержания оксигемоглобина и увеличение содержания дезокси- и метгемоглобина. Содержание форм гемоглобина отклоняется от усреднённого хода температурной зависимости, что происходит в одном или нескольких температурных интервалах около +8-+12, +18-+24, +28-+30°C. В настоящем исследовании определено, что температура влияет на состояние гемоглобина в гемолизате таким образом, что содержание оксигемоглобина уменьшается значительно в области +20-+38°C, при этом увеличивается содержание дезокси- и метгемоглобина. Из графических данных,

представленных в работе [9], и описывающих влияние температуры на внутриэритроцитарный гемоглобин, видно, что при повышении температуры от +20°C до +38°C содержание оксигемоглобина внутри эритроцита уменьшается на 7-8%. В нашем исследовании показано, что при действии температуры на гемоглобин в гемолизате, начиная с +20°C и выше, содержание оксигемоглобина уменьшается на 18% (рис. 1) и на 22% (рис. 2). Существующий термотропный переход в области +20°C, по-видимому, связан с тем, что при этих температурах наблюдаются изменения характеристик глюкозного транспорта в эритроцитах [10], но это замечание справедливо для целостной клетки эритроцита, в нашем же исследовании эритроциты разрушены. Белковые перестройки наблюдаются в гипотермической области – была обнаружена способность белков в растворе претерпевать термоиндуцированные структурные изменения [11]. При сравнении количеств оксигемоглобина в растворах гемолизатов 3-х и 5-ти дней хранения, (рис. 1, 2), видно, что в начале температурной зависимости количество оксигемоглобина в растворе гемолизата 5-ти дней хранения меньше (82%) по сравнению с количеством оксигемоглобина в растворе гемолизата 3-х дней хранения (88%). При увеличении сроков хранения растворов гемолизата от 1 до 7 дней количество оксигемоглобина уменьшилось в целом по сравнению с раствором гемолизата 1 дня хранения. Т.е. в контроле при температуре +4°C содержание оксигемоглобина в растворе гемолизата 7 дней хранения было меньше по сравнению с содержанием оксигемоглобина в растворе гемолизата при +4°C 1 дня хранения. Возможно, это связано с тем, что в гемолизате мембраны эритроцитов отделены от клеток и не выполняют свою защитную функцию. Возможно, увеличение сроков хранения растворов гемолизата уменьшает способность гемоглобина связывать кислород при температуре выше +20°C. Это может быть связано с особенностями эритроцитов доноров, от которых получали растворы гемолизата.

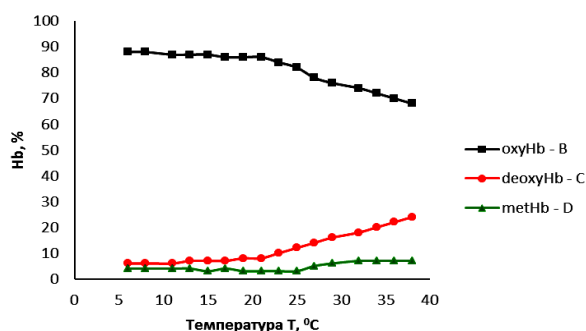


Рис. 1 – Содержание различных форм гемоглобина (окси-, дезокси- и метформы) в гемолизате 3-х дней хранения при действии температуры

Выводы

При увеличении сроков хранения растворов гемолизата от 1 до 7 дней количество оксигемоглобина уменьшается в целом по сравнению с раствором гемолизата 1 дня хранения. Это может быть связано, в частности, с особенностями эритроцитов доноров, от которых получали растворы гемолизатов.

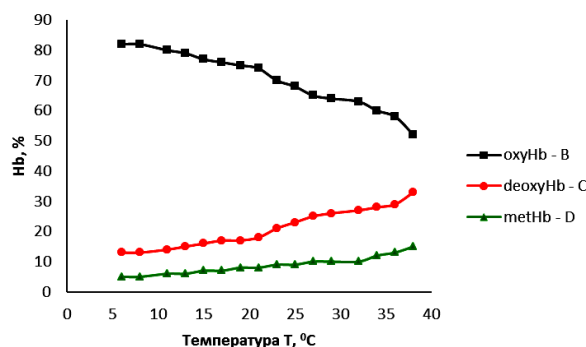


Рис. 2 – Содержание различных форм гемоглобина (окси-, дезокси- и метформы) в гемолизате 5-ти дней хранения при действии температуры

Список литературы

- 1 Стусь, Л. Н. Осцилляция форм гемоглобина в процессе хранения крови / Л. Н. Стусь, Е. Д. Розанова // *Биофизика*. – 1992. – Т.37, № 2. – С. 387-388.
- 2 Denniston, Katherine J. General, organic and Biochemistry / Katherine J. Denniston, Joseph J. Topping, Robert L. Caret – Towson University. – 2007. – 801 p.
- 3 Rossi-Bernardi, L. The specific influence of carbon dioxide and carbonate compounds on butter power and Bohr effects in human haemoglobin solutions / L. Rossi-Bernardi, F. J. W. Roughton // *J. Physiol.* – 1967. – Vol. 189. – P. 1-29.
- 4 Ehrenstein, G. Translational variations in the aminoacid sequence of the α -chain of rabbit hemoglobin / G. Ehrenstein // *Gold Spring Harbor Sympos. Quantit. Biol.* – 1966. – Vol. 31. – P. 705-714.
- 5 Fermi, G. Three-dimensional Fourier syntheses of human deoxyhaemoglobin at 2,5 Å resolution: refinement of the atomic model / G. Fermi // *J. Mol. Biol.* – 1975. – Vol. 97. – P. 237-256.
- 6 Takano, T. Structure of myoglobin refined at 2,0 Å resolution / T. Takano // *J. Mol. Biol.* – 1977. – Vol. 110. – P. 533-584.
- 7 Perutz, M. F. Stereochemistry of cooperative effects in haemoglobin / M. F. Perutz // *Nature*. – 1970. – Vol. 228. – P. 726-739.
- 8 Kruszyna, Harriet. Effects of temperature, oxygen, heme ligands and sulphhydryl alkylation on the reactions of nitroprusside and nitroglycerin with hemoglobin / Harriet

- Kruszyna, Robert Kruszyna** // *Biochemical pharmacology*. – 1993. – Vol. 46, № 1. – P. 95-102.
- 9 **Морозова, Т. Ф.** Влияние температуры на состояние внутриэритроцитарного гемоглобина / **Т. Ф. Морозова, Е. Д. Розанова, Н. Н. Тимченко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2007. – № 30. – С. 69-73.
- 10 **Матус, В. К.** Влияние хлорпромазина и температуры на транспорт глюкозы в телях эритроцитов человека / **В. К. Матус** // *Биофизика*. – 1977. – т. 22, вып. 5. – С. 861-865.
- 11 **Жуковский, А. А.** Об изменении теплоёмкости при денатурации белков / **А. А. Жуковский** // *Биофизика*. – 1983. – т. 34, вып. 33. – С. 518-519.
- sequence of the α -chain of rabbit hemoglobin / *Gold Spring Harbor Sympos. Quantit. Biol.* – 1966. – № 31. – P. 705-714.
- 5 **Fermi, G.** Three-dimensional Fourier synthesis of human deoxyhaemoglobin at 2,5 Å resolution: refinement of the atomic model / *J. Mol. Biol.* – 1975. – № 97. – P. 237-256.
- 6 **Takano, T.** Structure of myoglobin refined at 2,0 Å resolution / *J. Mol. Biol.* – 1977. – № 110. – P. 533-584.
- 7 **Perutz, M. F.** Stereochemistry of cooperative effects in haemoglobin / *Nature*. – 1970. – № 228. – P. 726-739.
- 8 **Kruszyna, Harriet.** Effects of temperature, oxygen, heme ligands and sulphhydryl alkylation on the reactions of nitroprusside and nitroglycerin with hemoglobin / *Biochemical pharmacology*. – 1993. – № 46. – P. 95-102.
- 9 **Morozova, T. F.** Temperature influence on the state of hemoglobin inside erythrocyte / *Vestnik NTU «ХПИ»*. – 2007. – № 30. – P. 69 - 73.
- 10 **Matus, V. K.** Influence of chlorpromazine and temperature on the glucose transport in erythrocyte shadows / *Biophysics*. – 1977. – № 22. – P. 861-865.
- 11 **Zhukovskiy, A. A.** About heat capacity changing at protein denaturation / *Biophysics*. – 1983. – № 34 – P. 518- 519.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Stus, L. N.** The oscillation of hemoglobin forms during blood storage / *Biophysics*. – 1992. – № 2. – S. 387- 388.
- 2 **Denniston, Katherine J.** General, organic and Biochemistry. – Towson University. – 2007. – 801 p.
- 3 **Rossi-Bernardi, L.** The specific influence of carbon dioxide and carbonate compounds on buffer power and Bohr effects in human haemoglobin solutions / *J. Physiol.* – 1967/ – № 189/ – P. 1-29.
- 4 **Ehrenstein, G.** Translational variations in the aminoacid

Поступила (received) 16.06.2015

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Акимов О. В., Алаа Фадил Адан** Улучшение эксплуатационных свойств деталей лазерным поверхностным легированием 3
- Андрусенко Е. Н.** Компьютерное моделирование изгиба буровой колонны при ее осевом и вращательном движениях 9
- Водка А. А., Гамаюнова А. А., Лелека С. В.** Разработка компьютерной системы для исследования вероятностных характеристик напряженного состояния и упругих свойств поликристаллического материала 14
- Воробьев Ю. С., Овчарова Н. Ю., Берлизова Т. Ю.** Зависимость термоупругого состояния охлаждаемой монокристаллической лопатки от азимутальной ориентации кристаллографических осей 21
- Костик К. О.** Зміцнення поверхні інструменту зі сталі 38Х2МЮА комплексною хіміко-термічною обробкою 26
- Кривиницький В. С.** Аналіз вимог, що пред'являються до пожежних суден 34
- Ларін О. М., Чернобай Г. О., Коханенко В. Б., Назаренко С. Ю.** Дослідження поздовжньої жорсткості пожежного рукава типу «Т» діаметром 77 мм з урахуванням структурних елементів пожежного рукава 41
- Ларін О. О., Грінченко К. Є.** Визначення показників надійності напівпричепу автоцистерни в експлуатації методами комп'ютерної механіки 47
- Фролов А. В.** Оценка эффективности преобразования световых потоков солнечными коллекторами 56

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Аврунин О. Г., Тымкович М. Ю.** Оптимизация нейрохирургических доступов с использованием цифрового атласа внутримозговых структур 63
- Аврьянова Л. А., Авакян А. К., Грушка А. В., Зинвалюк А. В., Куличенко В. В.** Оценка КТ-параметров костной ткани в планировании внутритканевой радионуклидной терапии 68
- Носова Я. В., Шушляпина Н. О., Носова Т. В.** Визуализация обонятельной щели 73
- Селиванова К. Г., Иванченко Ж. Б., Аврунин О. Г.** Биотехническая система диагностики состояния мелкого моторного развития 78
- Соковикова Н. С., Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Безкровный М. М.** Метод выделения изображений небесных объектов, смазанных собственным движением 83

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

- Большакова В. Л.** Моніторинг інформації щодо використання пробіотичних систем на основі *Lactobacillus acidophilus* у складі харчових продуктів 93
- Дмитрук Ю. В., Небесний Р. В., Івасів В. В., Мацьків О. О.** Альдольна конденсація метилпропіонату з формальдегідом на V_2O_3 - P_2O_5 - WO_3/SiO_2 каталізаторах 98
- Кондратюк Н. В.** Методологія вивчення показників якості солодких страв із капсульованими пробіотичними мікроорганізмами 103
- Степанова Т. М.** Инновационные идеи в технологии сладких железированных блюд на основе плодово-ягодного сырья 108
- Тимченко Н. Н., Рубакина В. А., Евстигнеев М. П., Лавриненко С. Н.** Влияние температуры на содержание различных форм гемоглобина 114

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

Akimov O., Alaa Fadhil Idan Improvement of performance properties of parts by laser surface alloying	3
Andrusenko E. Computer simulation of bending of the drill string during its axial and rotary motions	9
Vodka O., Hamaiunova A., Leleka S. Development of the computer system for investigations of the probability characteristics of the stress state and the elastic moduli of the polycrystalline materials	14
Vorobiev Yu., Ovcharova N., Berlizova T. Dependence of thermoelasticity status of the cooling monocrystalline blades from azimuthal orientation crystallographic axes	21
Kostyk K. Surface hardening of tool from steel 38Cr2MoAl complex chemical-heat treatment	26
Kropyvnytskyi V. An analysis of the requirements for fire and rescue crafts	34
Larin O., Chernobay G., Kohanenko V., Nazarenko S. A study of longitudinal stiffness of T-type fire hoses with 77mm diameter with structural elements fire hose	41
Larin O., Grinchenko K. Definition of reliability parameters tanker of semitrailer in exploitation by computer mechanics	47
Frolov A. Evaluation effectiveness of transformation luminous flux of solar collectors	56

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

Avrunin O., Tymkovych M. Optimization of neurosurgical access using the digital atlas of intracerebral structures	63
Averyanova L., Avakyan A., Grushka A., Zinvaluk A., Kulichenko V. Estimation of bone tissue CT-parameters for interstitial radionuclide therapy planning	68
Nosova Y., Shushlyapina N., Nosova T. Visualization of the olfactory slit	73
Selivanova K. G., Ivanchenko Z. B., Avrunin O. G. Biotechnical diagnostic system of the condition fine motor development	78
Sokovikova N., Savanevych V., Briukhovetskyi O., Bezkrivniy M. Development of method for image detection of celestial trailed objects greased by own movement	83

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

Bol'shakova V. Monitoring of probiotic systems using based on lactobacillus acidophilus in the food	93
Dmytruk Y., Nebesnyi R., Ivasiv V., Matskiv O. Aldol condensation of methyl propionate with formaldehyde over B ₂ O ₃ -P ₂ O ₅ -WO ₃ /SiO ₂ catalysts	98
Kondratjuk N. The methodology of the study desserts with encapsulated probiotic microorganisms indicators quality	103
Stepanova T. Innovative ideas in technology gelled sweet dishes based on fruit and berries raw materials	108
Timchenko N. N., Rubakina V. A., Evstigneev M. P., Lavrinenko S. N. Influence of the temperature on the contents of different forms of hemoglobin	114

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

Збірник наукових праць
Серія:
Нові рішення в сучасних технологіях
№ 39 (1148) 2015

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. № 35-15

Підп. до друку «15» вересня 2015 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,0. Облік.вид.арк. 10,0.
Тираж 100 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
