

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення
в сучасних технологіях**

№ 2' 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions
in modern technology**

No. 2' 2019

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv
NTU "KhPI", 2019

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2019. — № 2. — 95 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref, зареєстрований у світовому каталогізі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ»,
Україна

Члени редколегії:

Авдеєва О. П., НТУ «ХПІ», Україна
Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Вехов Є., Мерилендський університет, США
Горащ Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія
Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Клепіков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна
Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Мележик Є., Інститут фізики напівпровідників імені В. Є.
Лашкарьова НАНУ, Україна
Меньшикова С.І., НТУ «ХПІ», Україна
Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс,
Бразилія
Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Томашевський Р. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна
Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет,
Польща
Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна
Шестопалов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., NTU "KhPI", Ukraine
Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Buriakovskui S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Vekhov Ye., University of Maryland, College Park, USA
Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK
Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine
Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine
Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Melezhiuk Ye., V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine
Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine
Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil
Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Tomashevskyi R. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine
Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland
Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine
Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченого радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 9 від 01 листопада 2019 р.

УДК 622.691.063.6-022.252:001.891(477.74)

doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01

ДОСЛДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДІВ НА ДЛЯНЦІ ТАРУТИНЕ-ОРЛІВКА

О. Б. ВАСИЛІВ^{*}, О. С. ТІТЛОВ¹, А. П. ЛІПІН²

¹кафедра теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, УКРАЇНА

²кафедра технологічного обладнання зернових виробництв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, УКРАЇНА

*e-mail: oleg_vas@ukr.net

АННОТАЦІЯ У роботі наведено огляд стану транзиту природного газу територією України через газотранспортну систему та розглянуто перспективи подальшого завантаження враховуючи побудову альтернативних обхідних газопроводів. Як об'єкт дослідження вибрано відгалуження ГТС України у південному напрямку, яке проходить через газовимірювальну станцію «Орлівка» де здійснюється вимірювання кількості та визначення якості природного газу, що передається. На підставі аналізу даних про нерівномірність транзиту у вказаному напрямку проведено їх групування за кількісною ознакою та визначено необхідне число інтервалів. Розраховано відносну амплітуду коливань подачі газу та проведенні розрахунки показників гіdraulічної потужності газопроводів. Встановлено, що коливання максимальної та мінімальної гіdraulічної потужності за період з 2015 по 2018 рік змінювалися у межах 8.7-39.5, що свідчить про значні перепади у режимах роботи компресорних станцій та необхідність оптимізації їхньої роботи. На основі огляду літературних джерел з проблеми ефективної роботи газопроводів в умовах недовантаження, розроблена методика визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої комбінації працюючих газоперекачуючих агрегатів (ГПА). Розрахунки проводилися для газопроводу Ананіїв–Тирасполь–Ізмаїл на ділянці Тарутине–Орлівка. Методика містить розрахунок фізичних властивостей газу за його складом, розрахунок компримування газу, розрахунок лінійної частини, витрат газу на власні потреби компресорної станції та розрахунок сумарної потужності газоперекачуючих агрегатів при заданих технологічних обмеженнях. За допомогою розробленого оригінального програмного забезпечення у мові програмування MATLAB виконані циклічні багатоваріантні розрахунки пропускної здатності і енерговитратності газопроводу та проведена оптимізація режимів роботи компресорного цеху. За критерій оптимізації вибрана мінімальна сумарна потужність ГПА. Змінними параметрами при цьому є частоти обертання нагнітачів, різна комбінація працюючих ГПА, коефіцієнт завантаженості.

Ключові слова: газотранспортна система; недовантаження; гіdraulічна потужність; енерговитратність; оптимізація

RESEARCH GAS PIPELINE OPERATION MODES ON THE "TARUTINE-ORLIVKA" SECTION

О. ВАСИЛІВ¹, О. ТІТЛОВ¹, А. ЛІПІН²

¹Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa National Academy of Food Technologies, Odesa, UKRAINE

²Department of technological equipment of grain production, Odesa National Academy of Food Technologies, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT The paper gives an overview of the state of transit of natural gas through the gas transportation system through the territory of Ukraine. Prospects of further loading taking into account the construction of alternative bypass gas pipelines are considered. A branch of the GTS of Ukraine in the south direction, which passes through the gas-measuring station "Orlivka", was selected as a research object. There, the quantity and quality of the natural gas being transmitted are measured. Based on analysis of data on uneven of transit in the specified direction, they were grouped by quantitative characteristic and the required number of intervals was determined. The relative amplitude of gas supply oscillations was calculated and the hydraulic power parameters of gas pipelines were calculated. It is established that the fluctuations of the maximum and minimum hydraulic power for the period from 2015 to 2018 were varied within 8.7-39.5, which indicated significant differences in the modes of operation of the compressor stations and the need to optimize their operation. The relative amplitude of gas supply oscillations was calculated and the hydraulic power parameters of gas pipelines were calculated. On the basis of the review of literature sources on the problem of efficient operation of gas pipelines under conditions of underloading, a technique for determining the capacity and energy consumption of a gas pipeline for a given combination of working gas-pumping units (GPU) was developed. The calculations were carried out for the Ananiev–Tiraspol–Izmail gas pipeline on the Tarutyn–Orlivka section. The methodology includes the calculation of the physical properties of gas in its composition, the calculation of gas compression, the calculation of the linear part and the gas consumption for the compressor station's own needs and the calculation of the total power of the gas-pumping units with the given technological limitations. Using the original software developed in the MATLAB programming language, cyclical multivariate calculations of the capacity and energy consumption of the pipeline were performed and optimization of the compressor shop operating modes. For the optimization criterion, the minimum total capacity of the GPU is selected. Variable parameters at the same time are the speed of rotation of the supercharger, different combination of working GPU, load factor.

Keywords: gas transmission system; underloading; hydraulic power; energy consumption; optimization

Вступ

Україна володіє однією з найбільших в Європі і світі мережею газопроводів (ГТС) з пропускною здатністю на вході 288 млрд.м³ на рік, а на виході – 178,5 млрд.м³ газу на рік. Її довжина становить понад 39,8 тис.км.

ГТС України виконує такі важливі функції, як забезпечення природним газом споживачів в межах

країни, а також транзит газу до європейських держав через територію України.

У зв'язку з побудовою РФ альтернативних обхідних газопроводів («Ямал–Європа», «Північний потік», «Голубий потік») транзит через нашу країну за останні роки значно скоротився і складає близько 40% від загального обсягу поставок [1].

Прогноз попиту на російський газ у ЄС – один з найважливіших факторів при прогнозуванні необхідної потужності для транзиту. Тут можна виділити наступні аспекти [2,3]:

1. Падіння європейського видобутку газу і попиту на газ в ЄС.

2. Співвідношення об'ємів імпорту скрапленого природного газу (англ. LNG) на Європейському ринку і мережевого газу на європейському ринку.

3. Політична готовність європейських країн перевищувати певний поріг в залежності від російського мережевого газу.

4. Конкуренція газу і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в рамках кліматичної стратегії ЄС.

Транзит російського газу через Україну розділений на два напрямки, які не перетинаються один з одним: «південний» і «західний» напрямок транзиту [4].

Південний напрямок (ГВС «Орлівка») забезпечує транзит газу до Румунії, Болгарії, Туреччини і Греції (газопроводи: Шебелинка–Дніпропетровськ–Кривий Ріг–Ізмаїл (ШДКРІ); Роздільне–Ізмаїл (РІ); Ананьїв–Тирасполь–Ізмаїл (АТІ). До інших країн газ постачається «західним» напрямком. На південному напрямку проходять три газопровідні нитки загальною потужністю 26.8 млрд. м³/рік, з добовою продуктивністю 81,4 млн. м³/рік. Сьогодні транспортується щорічно біля 18 млрд. м³. Більша частина цих об'ємів призначена для Туреччини (біля 12 млрд. м³), в Болгарію і Грецію поступає в середньому по три млрд. м³/рік. Румунія отримує більше одного мільярда кубометрів, але ця країна у середньостроковій перспективі може і відмовитися від імпорту російського газу. З іншої сторони «Газпром» є єдиним постачальником газу в Молдову (2,9 млрд. м³/рік в 2018 р.), який вона сьогодні отримує з території України, і альтернативних варіантів тут не існує [4,5].

Першу нитку турецького потоку планується запустити в січні 2020 року. Після запуску цієї нитки турецького потоку потужністю 15.75 млрд. м³/рік Туреччина буде отримувати «свої» об'єми цим напрямком, відповідно південний напрямок українського транзиту буде задіяно лише на 6-7 млрд. м³/рік – для транспортування в Грецію, Болгарію і Румунію. Більше того, Греція і Болгарія через рік-два почнуть отримувати по 1 млрд. м³/рік з Азербайджану. З однієї сторони для цих країн – додаткова версифікація, але з іншої без цих 2 млрд. м³/рік завантаженість коридору зменшується з нинішніх 18 млрд. м³/рік до 4-5 млрд. м³/рік. Таким чином після запуску «турецького потоку» (перша нитка) завантаженість південного напрямку транзиту через українську ГТС значно зменшується. Це може бути зниження в 2 рази (найбільш оптимістичний сценарій) чи 3-4 рази при найбільш пессимістичному сценарію. Також необхідно підтримувати газотранспортну систему в південному напрямку для власних потреб, що ускладнює ситуацію [6].

Мета роботи

Отже, з огляду на те, що транзит газу через ГТС України в майбутньому падатиме, актуальним напрямком досліджень є, зокрема, розробка методу визначення пропускної здатності та енерговитратності експлуатації газопроводів і оптимізація режимів їх експлуатації [7,8].

Об'ектом досліджень вибрано ділянку газопроводу Тарутине–Орлівка з компресорною станцією «Тарутине» («південний напрямок»).

Поставлена мета реалізується через вирішення наступних **завдань**:

- обробка фактичних даних експлуатації газопроводу АТІ на ділянці Тарутине–Орлівка;

- розробка алгоритму визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої комбінації працюючих газоперекачувальних агрегатів (ГПА);

- розробка алгоритму розрахунку режиму роботи компресорної станції (КС);

- розробка оригінального програмного забезпечення визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу;

- проведення оптимізації режимів експлуатації ділянки Тарутине–Орлівка за критерієм мінімальних витрат потужності.

Методики досліджень

Обчислювальний алгоритм базується на використанні розрахункових формул, які рекомендовані чинними нормами технологічного проєктування магістральних газопроводів [9].

Викладення основного матеріалу

Аналіз фактічних режимів експлуатації ділянки. Транзит природного газу через ГВС «Орлівка» протягом 2014–2018 рр. наведено на рис. 1.

Місячні обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка» за період 2015–2018 рр. наведені на рис. 2.

З метою систематизації зібраних статистичних даних по транзиту через ГВС «Орлівка» за було проведено групування отриманих даних (рис. 3).

Якщо в основі групування лежить кількісна ознака, то число груп визначають за формулою Стерджесса [10]:

$$n = 1 + 3.322 \lg(N),$$

де N – кількість одиниць сукупності вибірки; n – число груп.

За звітний період кількість одиниць сукупності вибірки $N=1461$.

Виконаємо оцінку виду розподілу даних по добових об'ємах перекачування.

Таким чином, кількість інтервалів складе

$$n = 1 + 3.322 \lg(1461) = 11.54,$$

приєммо 12 інтервалів.

Далі визначимо величину інтервалу

$$h = \frac{Q_{\max} - Q_m}{K} = \frac{75187 - 16682}{12} = 4936.$$

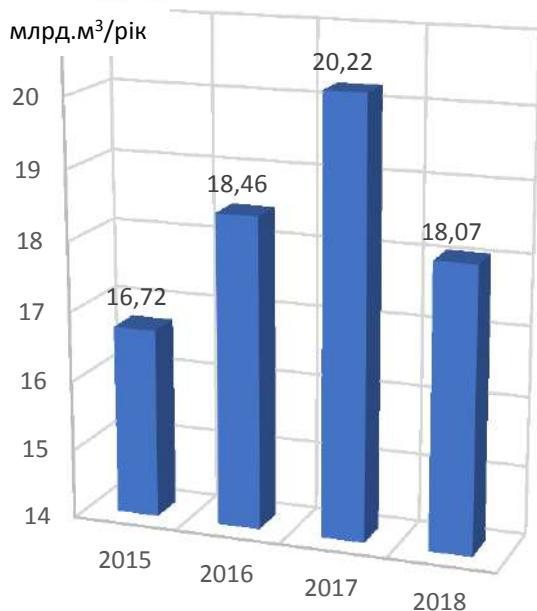


Рис. 1 – Річні обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка»

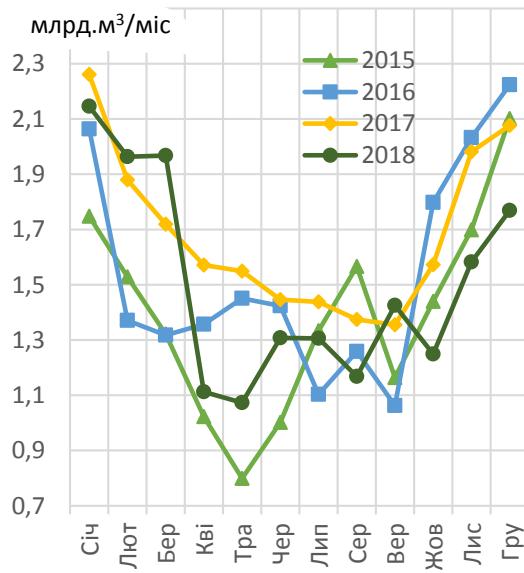


Рис. 2 – Обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка» помісячно за період з 2015 по 2018 рр.

Нерівномірність подачі газу по газопроводам протягом року характеризується наступними показниками:

$$\beta = \frac{Q_{max} - Q_m}{Q_m}; \quad \alpha = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}; \quad \gamma = \frac{Q_m}{Q_{min\ max}},$$

де Q_{max} – максимальна середньодобова подача газу за місяць в розрізі календарного року; Q_m – середньодобова подача газу за рік в цілому; Q_{min} – мінімальна середньодобова подача газу за місяць в розрізі календарного року.

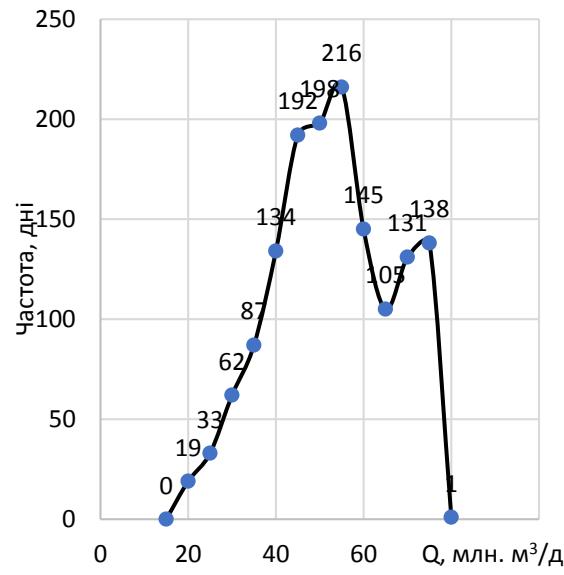


Рис. 3 – Частота розподілу добових обсягів перекачування

В табл. 1 наведений розподіл показників нерівномірності подачі газу через ГВС «Орлівка».

Таблиця 1 – Показники нерівномірності транзиту газу через ГВС «Орлівка»

Показник	2015	2016	2017	2018
Максимальне добове значення транзиту, Q_{max} , тис. м³/дн	70832	73638	74586	75187
Середньодобове значення транзиту, Q_m , тис. м³/дн	45817	50437	55405	49503
Нерівномірність транзиту, β	0.55	0.46	0.35	0.52
Нерівномірність подачі газу, α	4.14	4.41	4.16	4.71
Нерівномірність подачі газу, γ	0.65	0.68	0.74	0.66

Найбільш наочно нерівномірність подачі газу по газопроводах протягом року можна характеризувати коефіцієнтом β , що відображає відносну величину зміни коливань в подачі газу по газопроводу протягом року [11] (рис. 4).

Аналіз роботи різних газопроводів, зокрема ПАТ «Газпром» показує, що чисельне значення відносної амплітуди коливань подачі газу β змінюється в межах 0,08-0,25 та має тенденцію до подальшого росту. Це пов’язано зі збільшеними витратами газу в зимовий період на опалення, не дивлячись на заповнення підземних сховищ газу в літній період.

Натомість, аналіз обсягів транспортування через ГВС «Орлівка» показує, що отримане значення відносної амплітуди коливань подачі газу β значно перевищує дані, наприклад, по ПАТ «Газпром». Мінімальне значення β спостерігалося у 2017 р., оскільки тоді обсяг транзиту був максимальним (рис. 1).

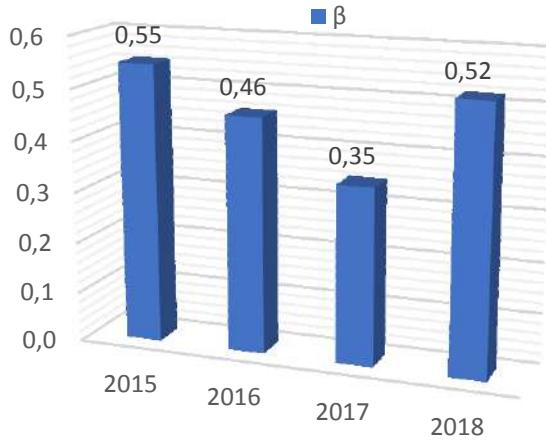


Рис. 4 – Показник нерівномірності транзиту газу β через ГВС «Орлівка»

Нерівномірність подачі газу по газопроводах протягом року описується рівнянням

$$Q = Q_m \left[1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) \right]; \quad (1)$$

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{\tau}{12}; \quad \varphi_0 = 2\pi \cdot \frac{\tau_0}{12};$$

де φ_0 – зсув по фазі на початок відліку; τ_0 – час від початку календарного року, що відповідає максимуму подачі газу по газопроводу за даний період.

Зі співвідношення (1) безпосередньо слідує:

$$\frac{Q_{max}}{Q_m} = 1 + \beta; \quad \frac{Q_{min}}{Q_m} = 1 - \beta.$$

Якщо прийняти, що потужність яка витрачається на перекачку газу по станції, пропорційна кубу пропускої здатності газопроводу, то поточна відносна потужність буде визначатися співвідношенням:

$$\frac{N}{N_m} = \left(\frac{Q}{Q_m} \right)^3 = [1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)]^3,$$

де N_m – гідрравлічна потужність (потенціальна (технічна) робота в одиницю часу, що витрачається на переміщення газу з області одного тиску до області іншого.), необхідна для перекачування середньорічної кількості газу (Q_m) по даному газопроводу.

Відповідно, відносні найбільші і найменші гідрравлічні потужності газопроводу складуть:

$$\frac{N_{max}}{N_m} = (1 + \beta)^3;$$

$$\frac{N_{min}}{N_m} = (1 - \beta)^3; \quad \frac{N_{max}}{N_{min}} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^3;$$

$$\frac{N_m}{N_0} = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau N d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{6\varphi}{\pi}} [1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)]^3 d\varphi$$

$$= 1 + 1.5\beta^2.$$

Наведені співвідношення дозволяють відносно легко визначати коливання гідрравлічної потужності газопроводів, та визначати недозавантаженість компресорних станцій.

На підставі отриманих даних про нерівномірність транзиту проведенні розрахунки

показників гідрравлічної потужності досліджуваного газопроводу (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники гідрравлічної потужності досліджуваного газопроводу

Показник	2015	2016	2017	2018
$\frac{N_{max}}{N_m} = (1 + \beta)^3$	3.695	3.112	2.440	3.504
$\frac{N_{min}}{N_m} = (1 - \beta)^3$	0.094	0.157	0.279	0.111
$\frac{N_{max}}{N_{min}} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^3$	39.5	19.8	8.7	31.5
$\frac{N_m}{N_0} = 1 + 1.5\beta^2$	1.447	1.317	1.180	1.404

Коливання максимальної та мінімальної гідрравлічної потужності за період з 2015 по 2018 рік змінюється в межах 8.7-39.5, що свідчить про значні перепади в режимах роботи компресорних станцій та необхідність оптимізації їх роботи.

Одним із головних завдань управління технологічним режимом роботи КС є підтримка тиску на стороні нагнітання на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами. При цьому під оптимальним розподілом розуміється таке навантаження агрегатів, яка забезпечує мінімум енерговитрат на компримування заданого обсягу газу при відповідних граничних умовах на вході і виході КС.

З огляду на особливості математичного опису компресорних станцій і результати аналізу керуючих впливів, була сформульована наступна задача оптимізації режимів роботи компресорної станції: при заданому обсязі газу і фіксованих граничних умовах – тиску на вході $P_{вх}$ виході $P'_{вх}$ і температури газу на вході $T_{вх}$ визначити таке поєднання машин, діаметр робочих коліс нагнітачів, обороти (в разі регульованого приводу) по ступенях, положення регулюючих уставок, щоб був забезпечений мінімум енергетичних витрат по КС [12]:

$$F = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{i,j}(\bar{r}, \bar{u})$$

і виконувалися наступні технологічні обмеження

$$P_{вих} < P'_{вих}, \quad n_{1\ min} \leq n_1 \leq n_{1\ max}, \quad N_{ij} < N'_{ij},$$

$$T_{вих} < T'_{вих}, \quad \Delta q < \Delta q',$$

де \bar{u} – вектор управління, компонентами якого є параметри: число оборотів і агрегатів, уставки кранів; \bar{r} – вектор режимів, який визначається тиском, витратою і температурою; m – число паралельних груп агрегатів, n – число послідовних ступенів, N'_{ij} , $T'_{вих}$, $\Delta q'$, $P'_{вих}$ – максимальні значення потужності, температури, байпасованої кількості газу і тиску на виході відповідно, $n_{1\ min}$, $n_{1\ max}$ – мінімальні і максимальні допустимі обороти нагнітачів.

Відповідно до [9] пропускою здатністю магістрального газопроводу називається кількість

газу, яка може бути передана газопроводом за добу в умовах стаціонарного режиму перекачування, максимально можливому використанні наявної потужності газоперекачувальних агрегатів (далі ГПА) та прийнятих параметрах (робочий тиск, коефіцієнт гідравлічної ефективності, температура навколошнього повітря і ґрунту, температура охолодження газу і т.п.).

Рішення поставленого завдання може бути здійснене шляхом проведення послідовних наближень до досягнення необхідної наперед заданої точності розрахунків [13]. Для чого задавшись певним значенням пропускної здатності системи в першому наближенні, проводять розрахунки режимів роботи компресорної станції та лінійної частини газопроводу при заданих температурних умовах повітря та ґрунту, розглядаючи дані об'єкти як єдину узгоджену систему (тобто тиск і температура газу на виході КС повинна дорівнювати тиску і температурі газу на початку лінійної ділянки, витрати газу в трубопроводі повинна дорівнювати продуктивності КС з врахуванням витрат газу на власні потреби компресорної станції). Якщо при цьому тиск на вході в наступну компресорну станцію, визначений розрахунками, не відповідатиме поставленій точності заданого тиску (в даному випадку номінальному), то необхідно змінити значення пропускної здатності на певну величину і знову провести всі необхідні розрахунки. Таким чином розрахунки необхідно проводити змінюючи значення витрати газу з певним кроком до досягнення необхідної точності. В такому випадку доцільним є створення алгоритму визначення пропускної здатності системи, на основі якого може бути розроблене програмне забезпечення для проведення розрахунків з використанням обчислювальної техніки.

Вхідними даними розрахунку є:

- продуктивність газопроводу Q_3 , млрд. м³/рік;
- довжина ділянки газопроводу L_{tp} , км;
- абсолютний тиск газу на вході в компресорну станцію $P_{vix_{KC}}$, МПа;
- температура газу на вході у компресорну станцію T_{vx} , К;
- абсолютний тиск газу в кінці ділянки на вході в наступну компресорну станцію $P_{vix_{KC}}$, МПа;
- склад природного газу в об'ємних частках;
- максимальне значення абсолютноого тиску газу на виході ГПА P_{dop} , МПа;
- середня за розрахунковий період температура повітря T_a , К;
- геодезична позначка майданчика КС.

КС «Тарутине» оснащена трьома повнонапірними відцентровими нагнітачами ГПА-Ц-16С з одиничною продуктивністю 35,5 млн. м³/д обладнаним двигуном ДГ90Л2. Потужність приводу становить 16 МВт. Номінальний тиск газу на виході 7,5 МПа. Паспортний ККД становить 34%, а фактичний знаходиться в діапазоні 31.76-33.96%.

Оскільки алгоритм визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої ГПА передбачає циклічні багатоваріантні

розрахунки та необхідність використання функцій інтерполяції, методів оптимізації та ін., було прийнято рішення про розробку програмного забезпечення у мові програмування MATLAB [14]. Ця мова програмування орієнтована на технічні і математичні розрахунки і здатна перевершити можливості традиційних мов програмування, які багато років використовувались для реалізації чисельних методів.

Особливості реалізації алгоритмі наступні:

1. Математичні моделі нагнітачів реалізовані у вигляді функцій в залежності від входного параметра Q_{zv} . Для кожної з функцій реалізований вбудований в систему MATLAB метод інтерполяції. Наприклад, функція для визначення політропічного ККД має наступний формат:

```
function y = f_eta_pol(Q_zv)
y = interp1([252 408 492], [0.72 0.84 0.775], Q_zv,
'pchip');
end
```

Функція `interp1` реалізує декілька методів побудови сплайну. Лінійна сплайн-інтерполяція, інтерполяція кубічним поліномом, інтерполяція кубічним сплайном та «Pchip» - інтерполяція кубічним ермітовим сплайном, що вибрана в даній моделі розрахунку.

Матриці з числами [252 408 492] та [0.72 0.84 0.775] – координати трьох точок з паспортних характеристик нагнітача.

2. Пошук оптимального значення режимів роботи КЦ здійснюється наступним чином:

- задається продуктивність газопроводу, або річна у млрд. м³/рік, або добова у млн. м³/добу;
- задається коефіцієнт завантаження кожного ГПА в межах 1-0,5 при роботі двох нагнітачів та одиниці у випадку використання одного ГПА;
- організовується цикл зміни частоти нагнітачів(а) при умові дотримання технологічних обмежень;
- проводиться розрахунок за наведеним вище алгоритмом;

- для кожної частоти та коефіцієнту завантаження фіксуються отримана сумарна потужність ГПА та умови при яких вона отримана;

- для кожної певної заданої продуктивності визначається мінімальні витрати потужності.

Отримані результати оптимальних режимів експлуатації записуються у файл Excel для подальшої обробки та побудови графічних залежностей.

Висновки

На основі розробленого програмного забезпечення у мові програмування MATLAB було виконано багатоваріантні розрахунки визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для різних комбінацій працюючих ГПА та встановлено, що, наприклад, за добової продуктивності 60 млн. м³ мінімальні витрати потужності склали 27945 кВт при двох працюючих

ГПА з частотами обертання нагнітачів $n_1 = 5165$ об/хв, $n_2 = 4792$ об/хв.

Також була проведена оптимізація режимів експлуатації ділянки Тарутине–Орлівка за критерієм мінімальних витрат потужності та визначені оптимальні режими експлуатації.

Список літератури

1. Eser, P. Impact of Nord Stream 2 and LNG on gas trade and security of supply in the European gas network of 2030 / P. Eser, N. Chokani, R. Abhari // *Applied energy*. – 2019. № 238. – P. 816-830.
2. МШУ «Сколково»: один год до часа «Ч»: в поисках компромисса по украинскому газовому транзиту. Декабрь 2018 // Национальная Ассоциация нефтегазового сервиса. – URL: <https://nangs.org/analytics/mshu-skolkovo-odin-god-do-chasa-ch-v-poiskakh-kompromissa-po-ukrainskomu-gazovomu-tranzitu-dekabr-2018-pdf>.
3. Wolczuk, K. Managing the flows of gas and rules: Ukraine between the EU and Russia / K. Wolczuk // *Eurasian Geography and Economics*. – 2016. – №57:1. – P. 113-137. – doi: 10.1080/15387216.2016.1174072.
4. Група Нафтогаз. Річний звіт. 2019. – URL: <http://www.naftogaz.com/files/Zvity/Annual-Report-2018-ukr.pdf> (дата звернення: 20.10.2019).
5. Yafimava, K. The Transit Dimension of EU Energy Security: Russian Gas Transit Across Ukraine, Belarus, and Moldova / K. Yafimava // *OUP Catalogue, Oxford University Press*. – 2011. N. 9780199599226. – URL: <https://ideas.repec.org/b/oxp/oobooks/9780199599226.html>.
6. Pirani, S. Russian Natural Gas Exports to Europe / S. Pirani // *Russian Analytical Digest*. – 2018. – 221.
7. Михалків, В. Б. Дослідження режимів роботи складної системи газопроводів у разі її недовантаження / В. Б. Михалків // *Нафтогазова галузь України*. – 2015. – № 6. – С. 26–29.
8. Titlov, O. Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units / O. Titlov, O. Vasyliv, T. Sahala, N. Bilenko // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2019. – P. 47-55. – doi:10.21303/2461-4262.2019.00978.
9. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Ч.1. Газопроводы: ОНТП 51-1-85. – [Введены 1986-01-01]. – М.: Мингазпром. – 221 с.
10. Sturges, H. A. The Choice of a Class Interval / H. A. Sturges // *Journal of the American Statistical Association*, 1926. – vol. 21. – no. 153, – P. 65-66.
11. Козаченко, А. Н. Енергетика трубопроводного транспорта газов / А. Н. Козаченко, В. И. Никишин, Б. П. Поршаков. – М.: Нефть и газ, 2001. – 398 с.
12. Гладун, С. В. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів роботи підземного сковища газу в системі магістральних трубопроводів : дис... на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи / С. В. Гладун; Національна академія наук України, Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача. – Львів, 2017. – 157 с.
13. Середюк, М. Д. Вибір енергоекспективних режимів експлуатації магістральних газопроводів за їх неповного завантаження / М. Д. Середюк, М. Є. Ганжа // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2017. – № 1. – С. 67-72.
14. Nagar, S. Introduction to MATLAB: For Engineers and Scientists / Nagar, S. – Berkeley, 2017. – 213 p. – doi: 10.1007/978-1-4842-3189-0.

References (transliterated)

1. Eser, P., Chokani, N., & Abhari, R. Impact of Nord Stream 2 and LNG on gas trade and security of supply in the European gas network of 2030. *Applied energy*, 2019, **238**, 816-830.
2. MShU "Skolkovo": odin god do chasa «Ch»: v poiskakh kompromissa po ukrainskomu gazovomu tranzitu [LNA "Skolkovo": one year before the hour "Ch": in search of a compromise on Ukrainian gas transit]. Dekabr 2018 // *Nacionalnaya Asociaciya nestegazovogo servisa [National Association of Oil and Gas Services]*. Available at: <https://nangs.org/analytics/mshu-skolkovo-odin-god-do-chasa-ch-v-poiskakh-kompromissa-po-ukrainskomu-gazovomu-tranzitu-dekabr-2018-pdf>.
3. Wolczuk, K. Managing the flows of gas and rules: Ukraine between the EU and Russia. *Eurasian Geography and Economics*, 2016, **57:1**, 113-137, doi: 10.1080/15387216.2016.1174072.
4. Hrupa Naftohaz. Richnyi zvit 2019 [Naftogaz Group. Annual Report: 2019]. Available at: <http://www.naftogaz.com/files/Zvity/Annual-Report-2018-ukr.pdf> (date of the application 20.10.2019).
5. Yafimava, K. The Transit Dimension of EU Energy Security: Russian Gas Transit Across Ukraine, Belarus, and Moldova. *OUP Catalogue, Oxford University Press*, 2011, 9780199599226. Available at: <https://ideas.repec.org/b/oxp/oobooks/9780199599226.html>.
6. Pirani, S. Russian Natural Gas Exports to Europe. *Russian Analytical Digest*, 2018, 221.
7. Mikhalkov, V. B. Doslidzhennia rezhymiv robotoy skladnoi systemy hazoprovodiv u razi yii nedovantazhennia [Investigation of modes of operation of a complex system of gas pipelines in case of its underloading]. *Naftohazova haluz Ukrayni [Oil and gas industry of Ukraine]*, 2015, 6, 26-29.
8. Titlov, O., Vasyliv, O., Sahala, T., Bilenko, N. Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units. *EUREKA: Physics And Engineering*, 2019, 47-55, doi:10.21303/2461-4262.2019.00978.
9. Obshestoyuznye normy tehnologicheskogo proektirovaniya. Magistralnye truboprovody. Ch. 1. Gazoprovody: ONTP 51-1-85 [All-Union norms of technological design. Trunk pipelines. Part 1. Gas pipelines: ONTP 51-1-85]. [Introduced 1986-01-01]. M.: Mingazprom, 221.
10. Sturges, H. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, **21** (153), 65-66.
11. Kozachenko, A. N., Nikishin, V. I., Porshakov, B. P. Energetika truboprovodnogo transporta gazov [Energy pipeline transport of gases]. M.: Neft i gaz [Oil and gas], 2001, 398.
12. Hladun, S. V. Modeliuvannia ta rozrakhunok optymalnykh parametrv roboty pidzemnoho skhovyshcha hazu v systemi mahistralnykh truboprovodiv [Model and rozrahnok optimal parameters robots pidzemnogo monsters gas in the system magistralnyh pipelines]: dys. na zdobuttia naukovoho stupenia kand. tekhn. nauk : 01.05.02 Natsionalna akademia nauk Ukrayni, Tsentr matematychnoho modeliuvannia Instytutu prykladnykh

- problem mekhaniky i matematyky im. Ya. S. Pidstryhacha [National Academy of Sciences of Ukraine, Center for Mathematical Modeling Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics named after Ya. S. Pidstrigach]. – Lviv, 2017, 157.
13. Serediuk, M. D., Hanzha, M. Ye. Vybir enerhoefektyvnixx rezhyiv ekspluatatsii mahistralnykh hazoprovodiv za yikh nepovnoho zavantazhennia [The choice of energy efficient modes of operation of the main
- gas pipelines with their incomplete loading]. Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichchnoho universytetu nafty i hazu [Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. 2017, 1, 67-72.
14. Nagar, S. Introduction to MATLAB: For Engineers and Scientists. Berkeley, CA: Apress, 2017, 213, doi: 10.1007/978-1-4842-3189-0.

Відомості про авторів (About authors)

Василів Олег Богданович – кандидат технічних наук, доцент, Одесська національна академія харчових технологій, доцент кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-0597-8863 , e-mail: oleg_vas@ukr.net.

Oleg Vasyliv – Candidate of Technical Sciences, Docent, Odesa National Academy of Food Technologies, Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-0597-8863 , e-mail: oleg_vas@ukr.net.

Тітлов Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Одесська національна академія харчових технологій, завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0003-1908-5713, e-mail: titlov1959@gmail.com.

Aleksandr Titlov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Odesa National Academy of Food Technologies, Head of Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0003-1908-5713, e-mail: titlov1959@gmail.com.

Ліпін Андрій Павлович – кандидат технічних наук, доцент, Одесська національна академія харчових технологій, доцент кафедри технологічного обладнання зернових виробництв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-2817-9589, e-mail: armavir62@ukr.net.

Andrii Lipin – Candidate of Technical Sciences, Docent, Odesa National Academy of Food Technologies, Department of technological equipment of grain production, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2817-9589, e-mail: armavir62@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Василів, О. Б. Дослідження режимів роботи газопроводів на ділянці Тарутине – Орлівка / **О. Б. Василів, О. С. Тітлов, А. П. Ліпін** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

Please cite this article as:

Vasyliv, O., Titlov, A., Lipin, A. Investigation of gas pipeline operating regimes at Tarutyno – Orlivka section. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 3-9, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Васылиев, О. Б. Исследование режимов работы газопроводов на участке Тарутине – Орловка / **О. Б. Васылиев, А. С. Титлов, А. П. Липин** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

АННОТАЦИЯ В работе представлен обзор состояния транзита природного газа по территории Украины через газотранспортную систему и рассмотрены перспективы дальнейшей загрузки учитывая построение альтернативных обходных газопроводов. В качестве объекта исследования выбрано ответвление ГТС Украины в южном направлении, которое проходит через газоизмерительную станцию «Орловка», где осуществляется измерение количества и определение качества передаваемого природного газа. На основании анализа данных о неравномерности транзита в указанном направлении проведено их группировки по количественному признаку и определены необходимое число интервалов. Рассчитана относительная амплитуда колебаний подачи газа и проведены расчеты показателей гидравлической мощности газопроводов. Установлено, что колебания максимальной и минимальной гидравлической мощности за период с 2015 по 2018 гг. изменялись в пределах 8.7-39.5, что свидетельствует о значительных перепадах в режимах работы компрессорных станций и необходимость оптимизации их работы. На основе обзора литературных источников по проблеме эффективной работы газопроводов в условиях недогрузки разработана методика определения пропускной способности и энергозатратности газопровода для заданной комбинации работающих газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Расчеты проводились для газопровода Ананьев–Тирасполь–Измаил на участке Тарутино–Орловка. Методика содержит расчет физических свойств газа по его составу, расчет компримирования газа, расчет линейной части, расхода газа на собственные нужды компрессорной станции и расчет суммарной мощности газоперекачивающих агрегатов при заданных технологических ограничениях. С помощью разработанного оригинального программного обеспечения на языке программирования MATLAB выполнены циклические многовариантные расчеты пропускной способности и энергозатратности газопровода и проведена оптимизация режимов работы компрессорного цеха. В качестве критерия оптимизации выбрана минимальная суммарная мощность ГПА. Переменными параметрами при этом являются частоты вращения нагнетателей, разная комбинация работающих ГПА, коэффициент загруженности.

Ключевые слова: газотранспортная система; недогрузка; гидравлическая мощность; энергозатратность; оптимизация

Поступила (received) 28.09.2019

СПЕКТР НАПРУГИ ІЗОЛЬОВАНОГО ІНВЕРТОРА З ДВОПОЛЯРНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ

*Кафедра промислової електроніки, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА
e-mail: verbitskiy@bigmir.net*

АННОТАЦІЯ У статті розглянуто інвертор напруги з гальванічною розв'язкою. Показано, що для ефективного використання високочастотного трансформатора, модуляцію напруги доцільно проводити за законом двополярної частотно-імпульсної модуляції з постійною тривалістю імпульсу. У цьому випадку трансформатор перемагнічується по граничні петлі гістерезису і тому за одну комутацію ключових елементів інвертора передається максимальна кількість енергії, що зменшує динамічні втрати у перетворювачі. На виході інвертора напруга, модульована за запропонованим законом, випрямляється і згладжується фільтром, після чого на виході перетворювача формується напруга, близька до синусoidalnoї. Основною задачею дослідження є аналіз спектру напруги високочастотного інвертора, модульованої за законом двополярної частотно-імпульсної модуляції, і випрямленої напруги, модульованої за законом однополярної частотно-імпульсної модуляції. Для аналізу спектра напруги запропоновано використовувати ряд Фур'є обох змінних, який дозволяє розділити вплив несучої і модулюючої функції на спектр модульованого сигналу. Оскільки сигнал з частотно-імпульсною модуляцією формується на основі несучої функції зі змінною частотою, його спектр розраховується з використанням функції перетворення змінної часу на основі широтно-імпульсної модульованого сигналу з несучою функцією, що має постійну частоту. Двополярна модуляція отримується шляхом опису двополярного сигналу як суми обох однополярних сигналів – одного з позитивною, іншого – з негативною полярністю. Розрахований спектр модульованого сигналу на виході інвертора свідчить про те, що енергія через високочастотний трансформатор передається в основному на проміжній частоті, що свідчить про ефективне використання трансформатора. Спектр випрямленого однополярного сигналу має яскраво виражену першу гармоніку та низький склад вищих гармонік, що спрощує їх фільтрацію та зменшує габарити фільтра. Отже використання запропонованого закону модуляції на практиці дозволить зменшити габарити високочастотного трансформатора та рівень динамічних втрат через зменшення кількості комутацій ключових елементів інвертора.

Ключові слова: інвертор з гальванічною розв'язкою; ряд Фур'є обох змінних; високочастотний трансформатор; частотно-імпульсна модуляція; спектральна характеристика

VOLTAGE SPECTRUM OF AN ISOLATED INVERTER WITH BIPOLAR PULSE FREQUENCY MODULATION

I. VERBYTSKYI

The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In this paper describes a voltage inverter with galvanic isolation. It is shown that for efficient use of a high-frequency transformer, it is advisable to perform voltage modulation according to the law of bipolar frequency-pulse modulation with a constant pulse duration. In this case, the transformer is magnetized by the hysteresis limit loop, and therefore the maximum amount of energy is transmitted in one commutation of the inverter switch elements, which reduces the dynamic losses in the converter. At the output of the inverter, the voltage, modulated by the proposed law, is rectified and smoothed by the filter, after which the output of the converter generates a voltage close to sinusoidal. The main objective of the study is to research the voltage spectrum of a high-frequency inverter modulated by the law of bipolar frequency-pulse modulation and rectified voltage, modulated by the law of unipolar frequency-pulse modulation. For the analysis of the voltage spectrum it is proposed to use a Double Fourier series, which allows to divide the influence of the carrier and the modulating function on the spectrum of the modulated signal. Since the frequency-modulated signal is formed on the basis of a variable-frequency carrier function, its spectrum is calculated using a variable-time conversion function based on a pulse-width modulated signal with a constant-frequency carrier function. Bipolar modulation is obtained by describing the bipolar signal as the sum of two unipolar signals - one with a positive and the other with a negative polarity. The calculated spectrum of the modulated signal at the output of the inverter indicates that energy is transmitted mainly through the high-frequency transformer at an intermediate frequency, which indicates the efficient use of the transformer. The rectilinear unipolar signal spectrum is transmitted with first harmonic and a low higher harmonic composition, which simplifies their filtration and reduces filter dimensions. Therefore, the application of the proposed modulation law in practice will reduce the size of the high-frequency transformer and the level of dynamic losses by reducing the commutations of switch elements of the inverter.

Keywords: inverter with galvanic isolation; Double Fourier series; high-frequency transformer; frequency pulse modulation; spectrum characteristic

Вступ

Імпульсна модуляція є одним з енергетично ефективних методів формування необхідної спектральної характеристики сигналів. Тому її

використовують для перетворення параметрів потужних сигналів, якими виступають напруга або струм, у перетворювачах електричної енергії. На практиці, найчастіше використовують широтно-

імпульсний (ШІМ), частотно-імпульсний (ЧІМ), релейний типи модуляції і їх модифікації залежно від структури перетворювача і особливостей його роботи [1-3]. В інверторах з гальванічною розв'язкою доцільно використовувати двополярну ЧІМ з постійною тривалістю імпульсу, $t_i = \text{const}$, рис. 1.

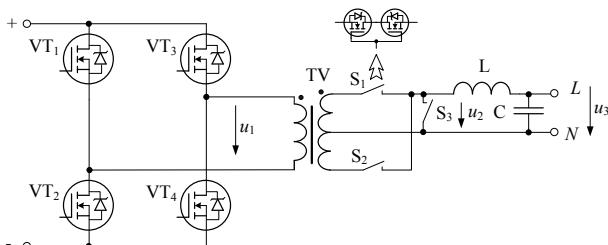


Рис. 1 – Схема інвертора з гальванічною розв'язкою

У таких схемах міст на транзисторах VT₁-VT₄ формує біполярну напругу u_1 , модульовану за законом ЧІМ з постійною тривалістю імпульсу $t_i = \text{const}$, зображену на рис. 2. Ця напруга передається через трансформатор TV і випрямляється на вихід, напруга u_2 . Після згладжування фільтром утворюється напруга u_3 близька до синусоїdalnoї.

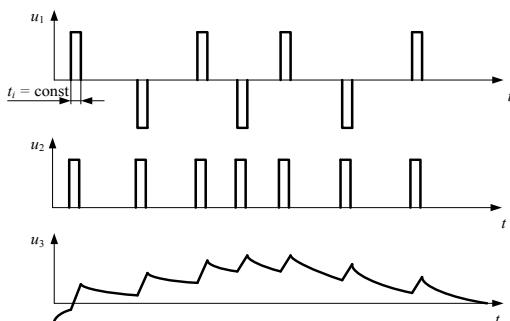


Рис. 2 – Часові діаграми роботи інвертора

У випадку використання ЧІМ з постійною тривалістю імпульсу $t_i = \text{const}$ трансформатор перемагнічується по граничній петлі гістерезису, що мінімізує його габарити. За умови використання запропонованого типу модуляції кількість імпульсів на одному періоді модулюючої напруги P залежить від вихідної потужності і може змінюватись з часом, що передбачає використання програмних методів модуляції з динамічною зміною параметрів [4-10]. На відміну від апаратних методів модуляції, при використанні яких в першу чергу враховується простота реалізації, основною перевагою програмних методів модуляції є їх значна гнучкість щодо формування необхідних спектральних характеристик. Ефективне використання програмних методів модуляції можливе за умови опису спектру в згорнутому аналітичному виді, що дає можливість швидкого перерахунку параметрів модуляції для отримання необхідних спектральних характеристик сигналу. В якості математичного апарату для опису спектральних характеристик у цьому випадку доцільно використовувати подвійний ряд Фур'є [11-13], оскільки при його використанні модулююча і несуча функції

описуються незалежно. Розглянемо принцип опису двополярної ЧІМ на основі ряду Фур'є двох змінних.

Мета роботи

У роботі пропонується схема інвертора з гальванічною розв'язкою, що забезпечує мінімальні габарити трансформатора за рахунок використання ЧІМ з постійною тривалістю імпульсу, $t_i = \text{const}$. Розробляється методика для оцінки спектру напруги, що передається через трансформатор, за допомогою ряду Фур'є двох змінних. На основі розрахованого спектру доводиться ефективність запропонованого схемного рішення.

Ряд Фур'є двох змінних

Коефіцієнти ряду Фур'є двох змінних C_{mn} , які є спектральними складовими сигналу з кратністю m відносно частоти ω несучої функції і кратністю n відносно частоти Ω модулюючої функції, розраховують за формулою [14]:

$$C_{mn} = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi x_2} \int_{x_1} f(x, y) e^{j(mx+ny)} dx dy, \quad (1)$$

де $f(x, y)$ – функція, спектр якої розраховується.

Безпосереднє використання ряду Фур'є двох змінних можливе лише до модульованих сигналів, відношення частоти несучої ω і модулюючої Ω функцій є постійним параметром, який називається кратністю модуляції $P = x / y = \text{const}$. Модульовані сигнали з постійним параметром кратності модуляції $P = \text{const}$ отримують методом ШІМ. Тому методика застосування ряду Фур'є двох змінних до інших типів модуляції, $P \neq \text{const}$, містить етап перетворення змінної часу $t^* = f(t)$, після застосування якого модульований сигнал має постійне значення кратності модуляції $P^* = \text{const}$. Розглянемо принцип формування двополярної ЧІМ та виведемо закон перетворення змінної часу $t^* = f(t)$ для цього закону модуляції.

Закон перетворення змінної часу $t^* = f(t)$

Програмні методи модуляції доцільно синтезувати на основі базових законів модуляції, які мають простий запис і близьку до бажаної спектральної характеристики. За умови використання ряду Фур'є двох змінних як базову можливо обрати ШІМ, найпростіший запис якої дійсний для другого роду модуляції, ШІМ-2. Отримання модуляції типу ЧІМ з базовою модуляцією ШІМ-2 здійснюється у два етапи:

- застосування до отриманої модульованої напруги перетворення змінної часу $t^* = f(t)$;
- інвертування полярності кожного другого імпульсу модульованої напруги.

Первинна форма напруги модульована ШІМ-2 та напруга після перетворення змінної часу показані на рис. 3 а) і 3 б) відповідно, модульована напруга після інвертування полярності кожного другого імпульсу показана на рис. 3 в).

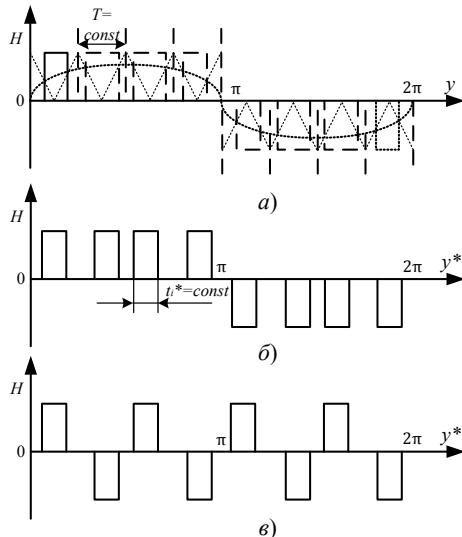


Рис. 3 – Ілюстрація до формування ЧМ сигналу

За умови переходу до ЧМ, тривалість імпульсу $t_i = \text{const}$, а довжина періоду несучої функції T_i^* за умови синусоїдальної модулюючої функції $F = \sin(\Omega t^*)$ на інтервалі i :

$$T_i^* = \frac{t_i^*}{\sin(\Omega t^*)}, \quad (2)$$

де Ω – кутова частота модулюючої функції.

Приріст змінної часу Δt^* на кожному наступному періоді несучої визначається тривалістю періоду T_i^* . За умови переходу до змінної Δy^* , отримаємо

$$\Delta y_i^* = \frac{y_i^*}{\sin(y^*)}. \quad (3)$$

Оскільки тривалість імпульсу y_i^* є константою, $y_i^* = \text{const}$, цей параметр пропорційний приросту первинної змінної часу Δy :

$$y_i^* = C\Delta y, \quad (4)$$

де C – константа.

Підставивши вираз (4) у формулу (3), отримаємо:

$$\Delta y_i^* = \frac{C\Delta y}{\sin(y^*)}. \quad (5)$$

Якщо приrostи по двом змінним прямують до нуля, $\Delta y \rightarrow 0$, $\Delta y^* \rightarrow 0$, що співпадається для більшості практичних випадків, отримаємо диференційне рівняння:

$$\sin(y^*) dy^* = Cd y. \quad (6)$$

Проінтегрувавши обидві частини диференційного рівняння (6), отримаємо:

$$-\cos(y^*) = Cy + C_1, \quad (7)$$

де C_1 – стала інтегрування.

Константи C і C_1 розраховуються з початкових умов $y^*(0) = 0$, $y^*(\pi/2) = \pi/2$: $C_1 = -1$; $C = -2C_1/\pi = 2/\pi$.

З урахуванням значень констант залежність $y^*(y)$, (7) має такий вид:

$$y^* = \arccos(1 - 2y/\pi). \quad (8)$$

Обернена залежність $y(y^*)$ є такою:

$$y = \pi(1 - \cos(y^*))/2. \quad (9)$$

Використовуючи залежність (8), розрахуємо тривалість імпульсу ЧМ в координатах змінної x несучої функції. Для цього використаємо відоме значення тривалості імпульсу ШМ в точці $\pi/2$:

$$x_i(\pi/2) = 2\mu. \quad (10)$$

Знаючи тривалість імпульсу по координаті x , аналогічне значення тривалості по координаті x^* розраховується за формулою:

$$x_i^*(\pi/2) = x_i(\pi/2) \frac{dy^*}{dy} \Big|_{y=\pi/2} = 2\mu \cdot \frac{2}{\pi} = 4\mu. \quad (11)$$

Отже тривалість імпульсу ЧМ на всьому періоді модулюючої функції складає $x_i^* = 4\mu$. Проаналізуємо спектр напруги після перетворення змінної часу $t^* = f(t)$, після якого сигнал буде модульований за законом однополярної ЧМ, рис. 3 б).

Спектр однополярної ЧМ

Спектральні складові C_{mn}^+ однополярної ЧМ утворюються з формули спектральних складових C_{mn}^* базової модуляції ШМ-2.

$$C_{mn}^+ = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{2\pi} H(y) \int_{\pi(1-\gamma(y))}^{\pi(1+\gamma(y))} e^{j(mx+ny)} dx dy, \quad (12)$$

де γ – коефіцієнт заповнення імпульсів.

Коефіцієнт заповнення імпульсів $\gamma(y)$ розраховується з використанням формули (8):

$$\gamma(y) = \mu \cdot \sin(y^*(y)) = \mu \cdot \sin(\arccos(1 - 2y/\pi)).$$

Після підстановки виразу $\gamma(y)$ у формулу (12) отримаємо формулу для розрахунку спектру базового модульованого сигналу:

$$C_{mn}^* = \frac{H}{2\pi^2} \left(\int_0^{\pi(1-\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))} \int_{\pi(1-\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))}^{\pi(1+\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))} e^{j(mx+ny)} dx dy - \int_{\pi(1-\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))}^{\pi(1+\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))} \int_0^{\pi(1-\mu \sin(\arccos(1-2y/\pi)))} e^{j(mx+ny)} dx dy \right). \quad (13)$$

При переході до однополярної ЧМ ширина імпульсів на кожному періоді несучої функції є постійною і розраховується за формулою (11). Зміщення імпульсів ЧМ здійснюється по двом змінним x і y . По змінній y на кут $\phi_y = (y^*(y) - y)$ і по змінній x на кут $\phi_x = P(y^*(y) - y)$.

$$C_{mn}^+ = \frac{H}{2\pi^2} \left(\int_0^{\pi} e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi) - y) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} \times \int_{\pi-2\mu}^{\pi+2\mu} e^{j(mx+ny)} dx dy - \int_{\pi}^{2\pi} e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi) - y) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} \times \int_{\pi-2\mu}^{\pi+2\mu} e^{j(mx+ny)} dx dy \right) = \frac{H(-1)^m \sin(m2\mu)}{m\pi^2} (1 - (-1)^n) \times \int_0^{\pi} e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y)))} dy. \quad (14)$$

Для парних n , $n = 2k$ спектральні гармоніки C_{mn}^+ дорівнюють нулю, $C_{m(2n)}^+ = 0$, а для непарних розраховуються за формулою:

$$C_{m(2n-1)}^+ = \frac{2H(-1)^m \sin(m2\mu)}{m\pi^2} \times \\ \times \int_0^\pi e^{j((2n-1)(\arccos(1-2y/\pi)) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} dy = \\ = \frac{2H(-1)^m \sin(m2\mu)}{m\pi^2} \left(\int_0^\pi T_{2n-1+mP} \left(1 - \frac{2y}{\pi} \right) e^{-jmPy} dy + \right. \\ \left. + j \int_0^\pi \sqrt{1 - T_{2n-1+mP}^2 \left(1 - \frac{2y}{\pi} \right)} e^{-jmPy} dy \right), \quad (15)$$

де T_n - поліном Чебишева першого роду порядку n [15].

В формулі (15) існує невизначеність $0/0$ для випадку $m = 0$, значення спектральної характеристики $C_{0(2n-1)}^+$ для цього випадку є таким:

$$C_{0(2n-1)}^+ = \frac{4H\mu}{\pi^2} \left(\int_0^\pi T_{2n-1} \left(1 - \frac{2y}{\pi} \right) dy + j \int_0^\pi \sqrt{1 - T_{2n-1}^2 \left(1 - \frac{2y}{\pi} \right)} dy \right).$$

Сигнал з однополярною ЧІМ і його спектр зі значенням параметрів $P = 20$, $\mu = 0.9$, $H = 1$ показано на рис. 4 а) і 4 б) відповідно.

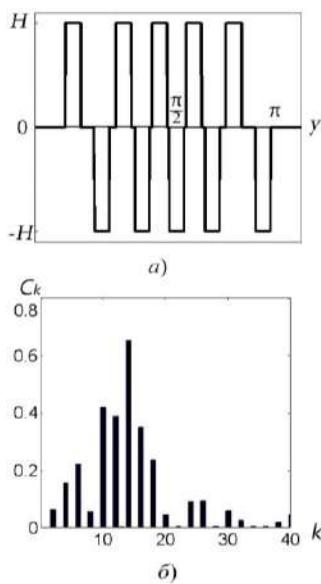


Рис. 4 – Сигнал з однополярною ЧІМ (а) та його спектр (б)

Спектр двополярної ЧІМ

Для розрахунку спектру двополярної ЧІМ, у базовому модульованому сигналі на основі ШІМ-2, наведеному на рис. 5 а), інвертується полярність кожного другого імпульсу напруги, рис 5 б). Далі цей сигнал розкладається на два модульованих сигналі, наведених на рис. 5 в) і 5 г). Ці сигнали мають вдвічі меншу кратність модуляції $P^* = P / 2$ при такій же залежності модулюючої функції $y^* = y$. Тому значення змінної x^* зменшується в два рази, $x^* = P^* y^* = P y / 2$, також зменшується значення параметра глибини

moduliacii $\mu^* = \mu / 2$. Далі до цих сигналів застосовується закон перетворення змінної часу $t^* = f(t)$. Розглянемо особливості модуляції сигналів, наведених на рис. 5 в) і рис. 5 г).

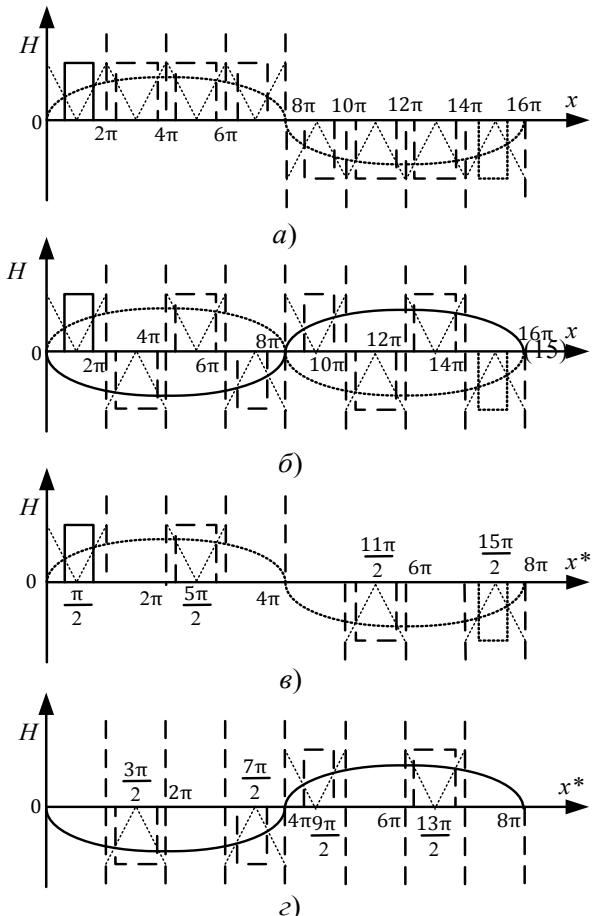


Рис. 5 – Ілюстрація до розрахунку спектра двополярної ЧІМ

Сигнал рис. 5 в) на першій половині періода, $y^* = 0.. \pi$, модулюється відносно точок $x^* = \pi/2 + 2\pi m$, на другій половині періода, $y^* = \pi..2\pi - x^* = 3\pi/2 + 2\pi m$. Відмінність модульованого сигналу зображеного на рис. 5 г) у порівнянні з рис. 5 в) полягає у тому, що на першій половині періода, $y^* = 0.. \pi$, сигнал модулюється відносно точок $x^* = 3\pi/2 + 2\pi m$, на другій половині періода, $y^* = \pi..2\pi - x^* = \pi/2 + 2\pi m$.

Формули для розрахунку спектральних складових сигналу з базовою модуляцією C_{mn} є такими:

$$C_{mn1} = \frac{H}{2\pi^2} \left(\int_0^{\pi} \int_{\pi(1-\mu \cdot \sin(\arccos(1-2y/\pi))/2)}^{\pi(1+\mu \cdot \sin(\arccos(1-2y/\pi))/2)} e^{j(mx+ny)} dx dy - \right. \\ \left. - \int_{\pi(3-\mu \cdot \sin(\arccos(1-2(y-\pi)/\pi))/2)}^{\pi(3+\mu \cdot \sin(\arccos(1-2(y-\pi)/\pi))/2)} e^{j(mx+ny)} dx dy \right). \quad (16)$$

Після застосування функції перетворення часу $t^* = f(t)$, отримаємо:

$$C_{mn1}^+ = \frac{H \sin(m\mu)(j)^m}{m\pi^2} (1 - (-1)^{m+n}) \times \\ \times \int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} dy. \quad (17)$$

У формулі (17) є невизначеність при $m = 0$, після її усунення отримаємо:

$$C_{0n1}^+ = \frac{2\mu H}{2\pi^2} \left(\int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)))} dy - \right. \\ \left. - \int_\pi^{2\pi} e^{j(n(\arccos(1-2(y-\pi)/\pi) + \pi))} dy \right) = \\ = \frac{2\mu H}{2\pi^2} (1 - (-1)^n) \int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)))} dy. \quad (18)$$

Формули для розрахунку спектральних складових другого модульованого сигналу, зображеного на рис. 5 г) є подібними:

$$C_{mn2}^+ = -\frac{H \sin(m\mu)(j)^m}{m\pi^2} ((-1)^m - (-1)^n) \times \\ \times \int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} dy; \quad (19)$$

$$C_{0n2}^+ = -\frac{2\mu H}{2\pi^2} \left(\int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)))} dy - \right. \\ \left. - \int_\pi^{2\pi} e^{j(n(\arccos(1-2(y-\pi)/\pi) + \pi))} dy \right) = \\ = -\frac{2\mu H}{2\pi^2} (1 - (-1)^n) \int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)))} dy. \quad (20)$$

Спектр напруги з двополярною модуляцією є сумою спектрів двох сигналів:

$$C_{mn}^+ = \frac{H \sin(m\mu)(j)^m}{m\pi^2} (1 - (-1)^{m+n} - (-1)^m + (-1)^n) \times \\ \times \int_0^\pi e^{j(n(\arccos(1-2y/\pi)) + mP(\arccos(1-2y/\pi) - y))} dy. \quad (21)$$

$$C_{0n}^+ = C_{0n1}^+ + C_{0n2}^+ = 0.$$

Вираз (21) не дорівнює нулю за умови парних $n, n = 2k$ і непарних $m, m = 2k + 1$:

$$C_{(2m-1)(2n)}^+ = -\frac{4jH \sin((2m-1)\mu)}{(2m-1)\pi^2} \times \\ \times \int_0^\pi e^{j(2n(\arccos(1-2y/\pi)) + (2m-1)P(\arccos(1-2y/\pi) - y))} dy. \quad (22)$$

Сигнал з двополярною ЧІМ і його спектр зі значенням параметрів $P = 20$, $\mu = 0.9$, $H = 1$ показано на рис. 6 а) і б) відповідно.

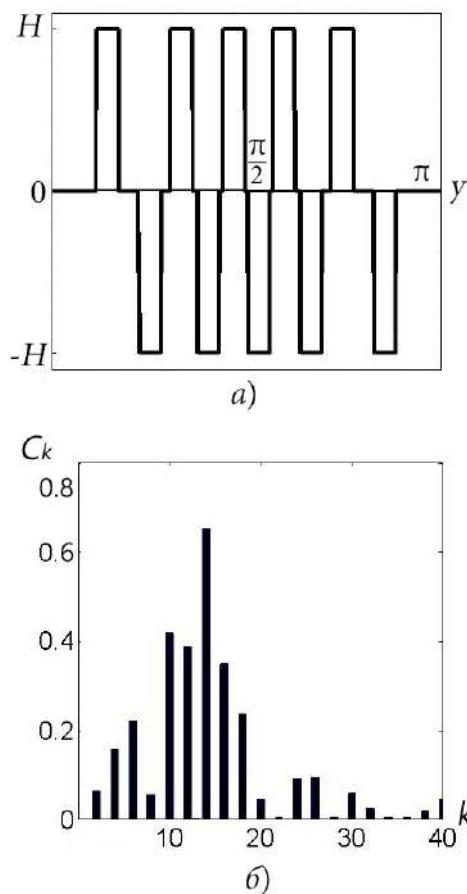


Рис. 6 – Двополярна ЧІМ: а) в часовій області, б) в частотній області

Як видно з рис. 6 б) спектр сигналу з біополярною ЧІМ в основному передається на частоті несучої функції.

Висновки

Біополярна ЧІМ використовується в інверторах з гальванічною розв'язкою для зменшення габаритів трансформатора. Для оцінки спектру сигналу з біополярною ЧІМ запропоновано використовувати ряд Фур'є двох змінних. Спектр ЧІМ розраховано на основі модуляції ШІМ-II з використанням функції перетворення часу. Результати розрахунків свідчать, що енергія через трансформатор передається в основному на проміжній частоті, що свідчить про доцільність використання запропонованого принципу модуляції на практиці.

Список літератури

1. Vasca, F. Dynamics and Control of Switched Electronic Systems: Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters (Advances in Industrial Control) / F. Vasca L. Iannelli // Springer-Verlag, London, 2012. – 493 p. – doi: 10.1007/978-1-4471-2885-4.

2. **Black, H. S.** Modulation Theory / **H. S. Black** // New York: *Van Nostrand*, 1993.
3. **Billings, Keith H.** Switchmode power supply handbook / **Keith H. Billings, Taylor Morey** // *McGraw-Hill*, 2011. – 414 p.
4. **Mehrasa, M.** A Novel Modulation Function-Based Control of Modular Multilevel Converters for High Voltage Direct Current Transmission Systems / **M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, S. Zabihi, J. Trujillo Caballero, and J. Catalão** // *Energies*. – 2016. – V. 9, 11. – 867 p. – doi: 10.3390/en9110867.
5. **Sirisukprasert, S.** Optimum harmonic reduction with a wide range of modulation indexes for multilevel converters / **S. Sirisukprasert, Lai Jih-Sheng, Liu Tian-Hua** // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2002. – Vol. 49(4). – p. 875-881. – doi: 10.1109/tie.2002.801226.
6. **Kazmierkowski, M. P.** DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions. / **M.P. Kazmierkowski, M. Jasinski, G. Wrona** // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2001. – 7(2). – P. 204-211. – doi: 10.1109/tnii.2001.2134856.
7. **Shi, X.** An Efficiency-Optimized Isolated Bidirectional DC-DC Converter with Extended Power Range for Energy Storage Systems in Microgrids / **X. Shi, J. Jiang, X. Guo** // *Energies*. – 2013. – Vol. 6. – P. 27-44. – doi: 10.3390/en6010027.
8. **Verbytskyi, Ievgen.** A double fourier series implementation for modulated signal with the arbitrary modulation / **Ievgen Verbytskyi** // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017. – P. 518-521. – doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100295.
9. **Mikolaiets, D.** The calculating algorithm of active power line conditioner with uninterruptible power supply function. / **D. Mikolaiets** // IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2015. – doi: 10.1109/elnano.2015.7146945.
10. **Krismer, F.** Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters / **F. Krismer, J. W. Kolar** // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2012. – Vol. 27(1). – P. 174–188. – doi: 10.1109/tpe.2011.2157976.
11. **Вербицкий, Е. В.** Использование двойного ряда Фурье для расчета спектра модулированных сигналов / **Е. В. Вербицкий** // *Технічна електродинаміка* – 2014. – № 4. – С. 96-98.
12. **Verbytskyi, Ievgen.** Spectrum calculation of frequency pulse modulation voltage using double Fourier series / **Ievgen Verbytskyi** // Conference IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering. – Riga, 2015. – P. 1-4. – doi 10.1109/AIEEE.2015.7367287.
13. **Jiao, N.** Harmonic Analysis of Output Voltage in PWM Inverters / **N. Jiao, S. Wang, T. Liu** // *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. – 2018. – doi: 10.1109/peac.2018.8590551.
14. **Holmes, D. Grahame.** Pulse width modulation for power converters. Theory and practice / **D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo** // *IEEE Press Series on Power Engineering*, 2003. – 724 p.
15. **Watson, G. N.** A treatise on the theory of Bessel functions / **G. N. Watson** // *Cambridge university press*. 1995. – 724 p.

References (transliterated)

1. **Vasca, F., Iannelli, L.** Dynamics and Control of Switched Electronic Systems: Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters (Advances in Industrial Control). *Springer-Verlag*, London, 2012, 493, doi: 10.1007/978-1-4471-2885-4.
2. **Black, H. S.** Modulation Theory. New York: *Van Nostrand*, 1993.
3. **Billings, Keith H., Taylor, Morey.** Switchmode power supply handbook *McGraw-Hill*, 2011, 414 p.
4. **Mehrasa, M., Pouresmaeil, E., Zabihi, S., Trujillo Caballero, J., and Catalão, J.** A Novel Modulation Function-Based Control of Modular Multilevel Converters for High Voltage Direct Current Transmission Systems. *Energies*, 2016, 9, 11, 867, doi: 10.3390/en9110867.
5. **Sirisukprasert, S., Jih-Sheng, Lai, Tian-Hua, Liu.** Optimum harmonic reduction with a wide range of modulation indexes for multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 49(4), 875-881, doi: 10.1109/tie.2002.801226.
6. **Kazmierkowski, M. P.** DSP-Based Control of Grid-Connected Power Converters Operating Under Grid Distortions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(2), 204-211, doi: 10.1109/tnii.2011.2134856.
7. **Shi, X., Jiang, J., Guo, X.** An Efficiency-Optimized Isolated Bidirectional DC-DC Converter with Extended Power Range for Energy Storage Systems in Microgrids. *Energies*, 2013, 6, 27-44, doi: 10.3390/en6010027.
8. **Verbytskyi, Ievgen.** A double fourier series implementation for modulated signal with the arbitrary modulation. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, 518-521, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100295.
9. **Mikolaiets, D.** The calculating algorithm of active power line conditioner with uninterruptible power supply function. IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2015, doi: 10.1109/elnano.2015.7146945.
10. **Krismer, F., Kolar, J. W.** Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(1), 174–188, doi: 10.1109/tpe.2011.2157976.
11. **Verbytskyi, I. V.** Ispolzovanie dvoynogo ryada Furie dlya rascheta spectra modulirovannyh signalov [Using of Double Fourier series for modulated signals spectrum calculation]. *Technichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*, 2014, 4, 96-98.
12. **Verbytskyi, Ievgen.** Spectrum calculation of frequency pulse modulation voltage using double Fourier series. Conference IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, Riga, 2015, 1-4, doi 10.1109/AIEEE.2015.7367287.
13. **Jiao, N., Wang, S., Liu, T.** Harmonic Analysis of Output Voltage in PWM Inverters. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2018, doi: 10.1109/peac.2018.8590551.
14. **Holmes, D. Grahame, Lipo, Thomas A..** Pulse width modulation for power converters. Theory and practice. *IEEE Press Series on Power Engineering*, 2003, 724.
15. **Watson, G. N.** A treatise on the theory of Bessel functions. *Cambridge university press*, 1995, 724.

Інформація про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри промислової електроніки, факультет електроніки, Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbytskyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький, Є. В. Спектр напруги ізольованого інвертора з двополярною модуляцією / Є. В. Вербицький // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.02.

Please cite this article as:

Verbytskyi, I. Voltage spectrum of an isolated inverter with bipolar pulse frequency modulataion. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 10-16, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий, Е. В. Спектр напряжения изолированного инвертора с двуполярной модуляцией / Е. В. Вербицкий // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 10-16. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.02.

АННОТАЦИЯ В статье рассмотрен инвертор напряжения с гальванической развязкой. Показано, что для эффективного использования высокочастотного трансформатора инвертора, модуляцию напряжения целесообразно проводить по закону двуполярной частотно-импульсной модуляции с постоянной длительностью импульса. В этом случае трансформатор перемагничивается по предельной петле гистерезиса и поэтому за одну коммутацию ключевых элементов инвертора передается максимальное количество энергии, что уменьшает динамические потери в преобразователе. На выходе инвертора напряжение, модулированное по предложенному закону, выпрямляется и слаживается фильтром, после чего на выходе преобразователя формируется напряжение, близкое к синусоидальному. Основной задачей исследования является анализ спектра напряжения высокочастотного инвертора, модулированного по закону двуполярной частотно-импульсной модуляции, и выпрямленного напряжения, модулированного по закону однополярной частотно-импульсной модуляции. Для анализа спектра напряжения предложено использовать ряд Фурье двух переменных, который позволяет разделить влияние несущей и модулирующей функции на спектр модулированного сигнала. Поскольку сигнал с частотно-импульсной модуляцией формируется на основе несущей функции с переменной частотой, его спектр рассчитывается с использованием функции преобразования переменной времени на основе широтно-импульсно модулированного сигнала с несущей функцией, имеющей постоянную частоту. Двуполярная модуляция получается путем описания двухполлярного сигнала в виде суммы двух однополярных сигналов – одного с положительной, другого – с отрицательной полярностью. Рассчитанный спектр модулированного сигнала на выходе инвертора свидетельствует о том, что энергия через высокочастотный трансформатор передается в основном на промежуточной частоте, что свидетельствует об эффективном его использовании. Спектр выпрямленного однополярного сигнала имеет ярко выраженную первую гармонику и низкий состав высших гармоник, что упрощает их фильтрацию и уменьшает габариты фильтра. В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что использование предложенного закона модуляции на практике позволит уменьшить габариты высокочастотного трансформатора и уровень динамических потерь из-за уменьшения количества коммутаций ключевых элементов инвертора.

Ключевые слова: инвертор с гальванической развязкой; ряд Фурье двух переменных; высокочастотный трансформатор; частотно-импульсная модуляция; спектральная характеристика

Поступила (received) 02.10.2019

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БОКОВЫХ ПОРОД В ОТКАТОЧНЫХ ШТРЕКАХ

**А. Э. КИПКО¹, В. Б. ГОГО¹, Д. А. ЧЕПИГА¹, Ю. И. СИМОНОВА^{1*}, Е. С. ПОДКОПАЕВ¹,
Г. Э. БОЙЧЕНКО²**

¹ГВУЗ «ДонНТУ» МОН України, г. Покровськ, УКРАЇНА

²ООО «Шахта «Свято-Покровська №3», УКРАЇНА

*e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

АННОТАЦІЯ Цель исследований – определить на оптических моделях, имитирующих углепородный массив с выработками, закономерности распределения напряжений в боковых породах при охране откаточных штреков закладочным массивом. В работе используется комплексный метод, включающий анализ и обобщение условий охраны и поддержания участковых подготовительных выработок при разработке крутонаклонных и крутых угольных пластов, физическое моделирование с оптическими материалами и обработку экспериментальных данных. В результате выполненных исследований устойчивости участковых подготовительных выработок, при их охране податливыми сооружениями, установлено влияние закладочного массива на напряженное состояние боковых пород. Зафиксировано, что с увеличением жесткости надштревковой охранной полосы из дробленой породы ограниченных размеров, наибольшие касательные напряжения концентрируются в области контура выработки и у верхней границы бутовой полосы. Размещение закладочного массива в отработанной части лавы, на высоту этажа, обеспечивает плавный прогиб боковых пород по всей площади выработанного пространства и равномерное распределение напряжений в боковых породах. Напряженно-деформированное состояние боковых пород в углепородном массиве, вмещающем выработки, зависит от жесткости охранных сооружений, физико-механических свойств боковых пород и длины участка в породах кровли, который поддерживается охранным сооружением. Влияние закладочного массива на напряженное состояние боковых пород, оценивается с помощью коэффициента, учитывающего уровень концентрации напряжений в породах кровли и почвы разрабатываемого пласта, величина которого зависит от жесткости охранных сооружений, расположенных над штревком, изгибной жесткости боковых пород и длины участка в породах кровли, который поддерживается охранным сооружением. В условиях глубоких шахт, при разработке крутонаклонных и крутых угольных пластов, эксплуатационное состояние участковых подготовительных выработок, когда для их охраны используются надштревковые бутовые полосы или закладка выработанного пространства при ведении очистных работ, обеспечивается с учетом оптимального гранулометрического состава дробленой породы, влияющего на величину жесткости охранныго сооружения.

Ключевые слова: горное давление; обрушения; изгибные колебания; динамические нагрузки; податливая опора; закладка выработанного пространства

REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF LAYING ARRAYS ON THE STRESSED STATE OF THE LATERAL ROCKS IN THE ROLLING SHTRES

A. KIPKO¹, V. GOGO¹, D. CHEPIGA¹, Y. SIMONOVA¹, Y. PODKOPAYEV¹, H. BOICHENKO²

¹Public higher education institution «Donetsk National Technical University», Pokrovsk, UKRAINE

²LLC Mine Svyato-Pokrovskaya No. 3 Mine, UKRAINE

ABSTRACT The purpose of the research is to determine on the optical models that simulate a coal-bearing massif with workings, the patterns of stress distribution in the side rocks while guarding the return drifts by the filling array. A complex method is used in the work, including analysis and generalization of the conditions for the protection and maintenance of local preparatory workings in the development of steeply inclined and steep coal seams, physical modeling with optical materials and processing of experimental data. As a result of the studies of the stability of local preparatory workings, when they are protected by compliant structures, the influence of the filling mass on the stress state of the lateral rocks is established. It has been recorded that with increasing rigidity of the over-track guard strip of crushed rock of limited size, the greatest tangential stresses are concentrated in the area of the output contour and at the upper boundary of the rubble strip. Placing a filling mass in the worked-out part of the lava, to the height of the floor, provides a smooth deflection of the lateral rocks over the entire area of the worked out space and a uniform distribution of stresses in the lateral rocks. The stress-strain state of the side rocks in the coal-bearing massif containing the mine depends on the rigidity of the security structures, the physical and mechanical properties of the side rocks and the length of the section in the roof rocks, which is supported by the security structure. The influence of the stowage massif on the stress state of the side rocks is estimated using a coefficient that takes into account the level of stress concentration in the rocks of the roof and soil of the developed formation, the value of which depends on the rigidity of the security structures located above the drift, the bending stiffness of the side rocks and the length of the section in the roof rocks, which supported by a security structure. In deep mines, in the development of steeply inclined and steep coal seams, the operational condition of local preparatory workings, when over-run rubble strips are

used for their protection or the laying of the mined-out space during the treatment works, is provided taking into account the optimal particle size distribution of crushed rock, which affects the amount of hardness of the guard facilities.

Keywords: rock pressure; crushing; bending vibrations; load response; soil bearing; goaf stowing

Введение

Опыт эксплуатации шахт Донбасса, разрабатывающих крутонаклонные и крутые угольные пласты показывает, что с ростом глубины горных работ, в массиве осадочных горных пород, при ведении очистных и подготовительных работ, начинает проявляться негативный фактор – расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок.

В реальных условиях разработки крутонаклонных и крутых угольных пластов, при традиционных способах управления кровлей в очистном забое, в силу специфических особенностей их разработки, связанных с углами падения, превышающих углы внутреннего трения пород, под действием сил гравитации, расслоившиеся боковые породы верхней части лавы обрушаются и неконтролируемо перемещаются вниз [1,2]. Во многих случаях, обрушения расслоившихся боковых пород, распространяются на призабойное пространство лавы и сопровождаются завалом очистного забоя и откаточного штreta.

Неудовлетворительное состояние горных выработок, повышает уровень травматизма горнорабочих, а значит, разработка эффективных мероприятий, направленных на поддержание выемочных штреков в эксплуатационном состоянии, будет отвечать требованиям безопасного ведения горных работ.

Анализ исследований и публикаций

Анализ исследований показывает, что проявления горного давления в выработках, зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первостепенно следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Особенность углеродистого массива, вмещающего выработку, состоит в том, что во всех случаях контакт между породными слоями, представлен глинистыми разностями. В зонах разгрузки, глинистые породы увеличиваясь в объеме во времени, способствуют отрыву слоев более прочных пород и формируют условия обрушения, что является причиной ухудшения устойчивости горных выработок и травмирования горнорабочих [2].

Эффективность отработки угольных пластов и безопасность ведения горных работ в глубоких угольных шахтах, зависит от способа управления кровлей в очистном забое. Изучение процесса сдвигов и деформаций горных пород [3,4], указывает на то, что наиболее интенсивно процесс сдвига под- и надработанной толщи развивается при полном обрушении кровли или удержании кровли

на кострах, наименее интенсивно – при полной закладке выработанного пространства [3].

Изучение механизма взаимодействия блочной структуры расслоившихся пород кровли, при полном обрушении или удержании кровли на кострах, показывает, что без эффективного поддержания нависающей толщи, геомеханическая обстановка в окрестности очистной выработки резко ухудшается [5]. Внезапность обрушений расслоившихся боковых пород, приводящая к возможным завалам горных выработок, обуславливается, прежде всего горно-геологическим фактором, когда при ведении очистных работ, в призабойном пространстве лавы, происходит последовательное отделение слоев и их прогиб по нормали к напластованию, подобно балке, имеющей опоры [2,3]. Во избежание сложившейся ситуации, необходимо поддержание пород кровли закладочным массивом.

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвигов боковых пород в окрестности выработок и создает зоны устойчивости пород позади очистного забоя. Механизм взаимодействия закладочного массива с оседающими породами висячего бока, заключается в закрытии над закладочным массивом трещин разлома в породах кровли угольного пласта [6]. Из этого следует, что существенно изменить геомеханическую обстановку в углеродистом массиве, вмещающем выработки, можно за счет применения закладки выработанного пространства, что будет способствовать не только сохранению устойчивости боковых пород и эксплуатационного состояния горных выработок, но и повышению безопасности труда горнорабочих.

Постановка задачи

Определить влияние закладочного массива на напряженно-деформированное состояние боковых пород в массиве осадочных горных пород, вмещающем выработки, для сохранения их эксплуатационной устойчивости, применяя лабораторные исследования на моделях из оптических материалов.

Материалы и результаты исследований

В комплексе технических решений по охране участковых подготовительных выработок принят закладочный массив. Для оценки закладочного массива, как средства ограничивающего деформации боковых пород, выполнены лабораторные исследования на моделях из оптически-активных материалов. В качестве оптически-активного материала, при проведении исследований использовали игдантин [7].

Исследование моделей производилось на поляризационной установке ППУ-4, известным способом сопоставления цветов и полос распределения касательных напряжений [8,9]. Критерии подобия, упругие и оптические константы моделей, определены в соответствии с методикой, разработанной в ИГД им. А.А. Скочинского [8].

Модели, принятые в виде параллелепипедов, размером 300x300 мм, толщиной 20 мм, загружались по схеме, когда вертикальная нагрузка соответствовала глубине $H=1200$ м, а горизонтальная нагрузка, создавалась отпором боковых стенок.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе изучалось распределение касательных напряжений в боковых породах в окрестности очистной выработки при способе управления кровлей закладкой выработанного пространства. При этом жесткость закладочного массива, соответствовала $c=30\text{H/m}$ и $c=90\text{ H/m}$. Мощность пород непосредственной кровли и почвы, соответствовала $2m$, где m – мощность разрабатываемого угольного пласта, (м). Мощность пород основной кровли – $4m$. Отставание закладочного массива от груди очистного забоя $l=8m$. Было отработано 4 модели. В моделях мощность угольного пласта соответствовала $m=1,0$ м. Геометрический масштаб M1: 50.

На втором этапе исследований, изучаемые модели имитировали пластовый штрек с охраной надштрековой бутовой полосой размером $6m$ или закладочным массивом, который разместили по всей высоте этажа. Распределение напряжений изучалось в окрестности откаточного штрека, пройденного по угльному пласту мощностью $m=1.0$ м. Штрек арочной формы (высота 2,5 м, ширина 2,5 м).

Исследования проводились на моделях со слоями, которые принимались как непосредственная и основная кровля и почва угольного пласта, мощность которых соответствовала $2m$ и $4m$. Жесткость надштрековой бутовой полосы или закладочного массива, соответствовала, в одном случае $c=30\text{ H/m}$, в другом $c=90\text{ H/m}$. Угол падения пласта равен $\alpha = 60^\circ$. Масштаб моделирования M1:100.

При анализе статического поля касательных напряжений в углеродном массиве, вмещающем выработку, учитывалось положение о том, что объемное напряженное состояние боковых пород, по мере удаления от контура выработки, изменяется от состояния близкого к обобщенному растяжению, до обобщенного сжатия в глубине массива [10].

Исследуем модели, которые имитировали очистную выработку с закладкой выработанного пространства. На рис. 1 представлена схема моделей статического поля касательных напряжений в области очистной выработки, при способе управления кровлей закладкой выработанного пространства и разной жесткости закладочного массива.

Сравнение исходных картин статического поля касательных напряжений моделей показывает, что

при применении закладки выработанного пространства, распределение напряжений в боковых породах происходит равномерно (рис. 1 а, б). Самый высокий уровень напряжений, приводящий к деформациям боковых пород, во всех рассматриваемых случаях, приурочен к кромке очистного забоя, из-за прогиба кровли на закладочный массив.

При размещении в выработанном пространстве закладочного массива с жесткостью $c=90\text{H/m}$, уровень касательных напряжений на кромке очистного забоя несколько выше, чем при использовании для поддержания пород кровли закладочного массива, с жесткостью $c=30\text{ H/m}$ (рис. 1 а, б). Однако, во всех исследованных моделях, непосредственная кровля угольного пласта, опирающаяся с одной стороны на массив угля, а с другой – на закладочный массив, подвержена сжимающим усилиям, проявляющимся в плоскости напластования (рис. 1 а, б). Исходя из этого, при расположении выемочного откаточного штрека между целиком угля и закладочным массивом, при расстоянии между ними $l \leq 8m$, можно создать условия, в которых сохраняется эксплуатационная устойчивость подготовительных выработок.

Исходя из этого, проанализируем модели, имитирующие откаточный штрек с надштрековой бутовой полосой ограниченных размеров или закладкой выработанного пространства.

На рис. 2 представлены схемы статического поля касательных напряжений в углеродном массиве, при охране откаточного штрека надштрековой бутовой полосой размером $h=6m$. Сравнивались два варианта охраны штрека бутовой полосой. В одном случае, жесткость бутовой полосы соответствовала $c=30\text{ H/m}$, а в другом $c=90\text{H/m}$.

Анализ статического поля напряжений в моделях, дает основание для утверждения о том, что при охране пластового откаточного штрека бутовой полосой, высотой $h=6m$, имеем максимальную концентрацию напряжений в окрестности откаточного штрека (рис. 1 а). Увеличение жесткости бутовой полосы в 3.0 раза, когда $c=90\text{H/m}$, несколько видоизменяет характер распределения напряжений в углеродном массиве. Концентрация напряжений в подошве штрека, по сравнению с концентрацией напряжений в кровле, обусловлена разной кривизной контура выработки.

Сравнение модельных картин распределений напряжений в области откаточного штрека при охране бутовой полосой, указывает, что при увеличении жесткости полосы, наибольшие касательные напряжения концентрируются вблизи контура выработки и в месте изгиба пород кровли и почвы разрабатываемого пласта, у верхней границы бутовой полосы.

Из анализа моделей следует, что характер распределения напряжений в боковых породах и в области откаточного штрека, качественно изменяется при использовании для охраны пластовой выработки закладки выработанного пространства (рис. 3).

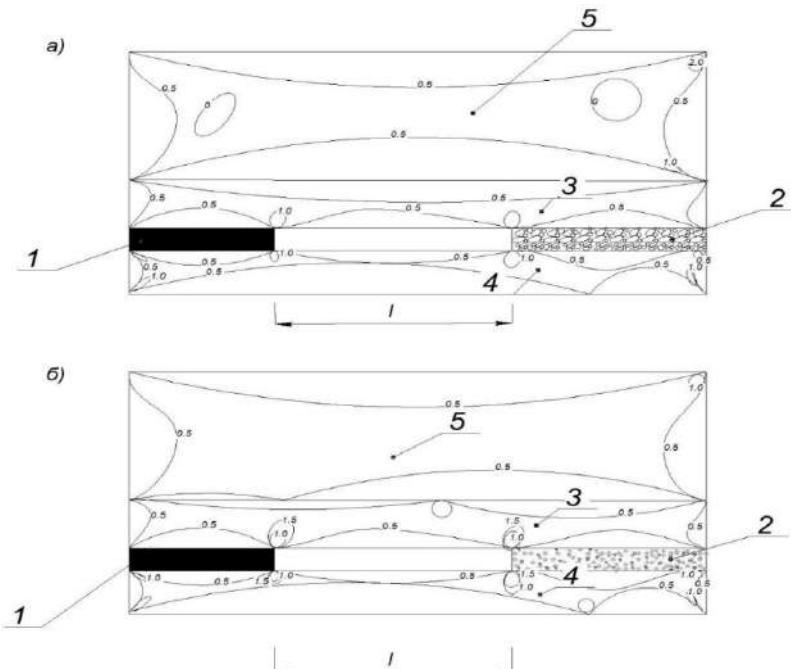


Рис.1 – Схеми моделей статического поля касательных напряжений в области очистной выработки при способе управления кровлей закладкой выработанного пространства и различной жесткости закладочного массива c (H/m): а) $c=30 \text{ H/m}$; б) $c=90 \text{ H/m}$; l – отставание закладочного массива от груди забоя, (м); 1 – угольный пласт; 2 – закладочный массив; 3 – непосредственная кровля; 4 – почва угольного пласта; 5 – основная кровля

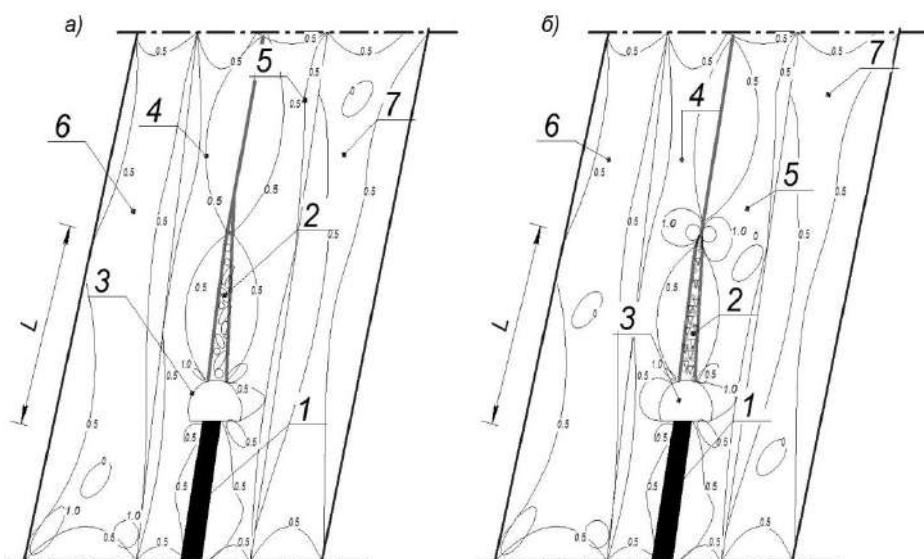


Рис.2 – Схемы моделей статического поля касательных напряжений в области откаточного штрека при охране бутовой полосой из дробленой породы высотой $h=6\text{m}$: а) жесткость бутовой полосы $c = 30 \text{ H/m}$; б) жесткость бутовой полосы $c = 90 \text{ H/m}$; L – длина поддерживаемого участка кровли бутовой полосой, м; t – мощность угольного пласта, м; 1 – угольный пласт; 2 – надштрековая бутовая полоса; 3 – откаточный штрек; 4 – непосредственная кровля; 5 – почва угольного пласта; 6 – основная кровля; 7 – почва

Размещение закладочного массива по всей длине отработанной части лавы (позади очистного забоя), обеспечивает плавный прогиб боковых пород (рис. 3 а). При этом площадь фактического контакта оседающих пород с закладочным массивом прирастает, в сравнении с охраной выработок надштрековыми бутовыми полосами. В случае

увеличения жесткости закладочного массива, повышения уровня напряжений в боковых породах практически не наблюдается. При этом происходит только перераспределение напряжений на границе контакта пород кровли и почвы с закладочным массивом (рис. 3 б).

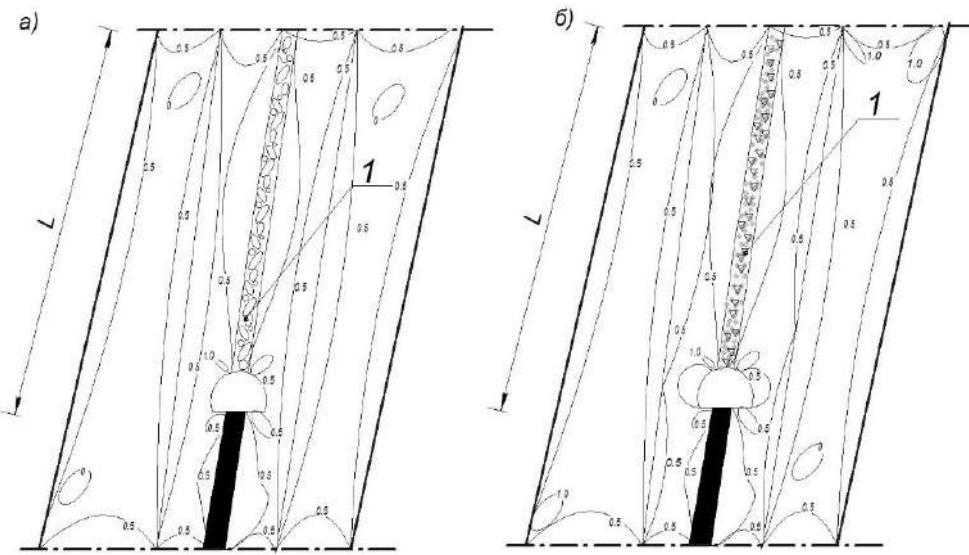


Рис. 3 – Схеми моделей статического поля касательных напряжений в области откаточного штрека при способе управления горным давлением полной закладкой выработанного пространства: а) жесткость закладочного массива $c = 30 \text{ Н/м}$; б) жесткость закладочного массива $c = 90 \text{ Н/м}$; L – длина поддерживаемого участка кровли закладочным массивом, м

В реальных условиях разработки угольных пластов крутонаклонного и крутого падения, при разных способах управления кровлей в лаве и охране штреков, сохранность подготовительных выработок обеспечивается за счет устойчивости пород кровли, как основного грузонесущего элемента подземного сооружения.

Исследование напряженно-деформированного состояния боковых пород, в т.ч. пород кровли угольного пласта, основывается на применении теории упругости, основные положения которой изложены в [11–16]. Используя экспериментальные данные и основные положения теории упругости и размерностей [11,12], оценим влияние закладочного массива на напряженное состояние боковых пород в углепородном массиве, вмещающем выработку, с помощью коэффициента, учитывающего изгибную жесткость боковых пород при различных способах охраны.

Основными величинами, характеризующими поведение боковых пород в пределах очистного пространства в моделируемой геомеханической системе, являются: жесткость охранного сооружения

c (Н/м); длина участка в породах кровли, который поддерживается охранным сооружением L (м); мощность пород непосредственной кровли h (м); толщина модели b (м); модуль упругости E ($\text{Н}/\text{м}^2$), модуль сдвига G ($\text{Н}/\text{м}^2$) для пород непосредственной кровли разрабатываемого пласта.

Для решения сформулированной задачи, имеем шесть фундаментальных переменных, а общее уравнение может быть записано в виде функциональной связи

$$k_M^z = f(c, l, h, b, E, G). \quad (1)$$

Построим таблицу размерностей и единиц измерения основных величин (табл. 1).

На основании данных табл. 1 составим матрицу размерностей, полученную из показателей формул размерностей (табл. 2).

Функциональное соотношение (1), можно выразить через безразмерные комбинации величин. Предположим, что между этими величинами существует соотношение

$$k_M^z = f(c^{k1}, l^{k2}, h^{k3}, b^{k4}, E^{k5}, G^{k6}). \quad (2)$$

Таблица 1 – Таблица основных величин и размерностей

Название величины	Символ	Формула размерности	Единица измерения величины в системе СИ
Жесткость охранных сооружений	c	МТ^{-2}	$1\text{Н/м}=1\text{ кг/с}^2$
Длина поддерживаемого участка в породах кровли охранным сооружением	L	L	м
Мощность непосредственной кровли	h	L	м
Толщина модели	b	L	м
Модуль упругости	E	$\text{МЛ}^{-1}\text{T}^2$	$\text{Н/м}^2=1\text{ кг/с}^2\text{м}$
Модуль сдвига	G	$\text{МЛ}^{-1}\text{T}^2$	$\text{Н/м}^2=1\text{ кг/с}^2\text{м}$

Таблица 2 – Матрица размерностей

Определение параметров	c	L	h	b	E	G
Показатель степени	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
[м]	1	0	0	0	1	1
[L]	0	1	1	1	-1	-1
[T]	-2	0	0	0	-2	-2

Тогда из полученной матрицы, выводим систему уравнений

$$\begin{cases} k_1 + k_5 + k_6 = 0, \\ k_2 + k_3 + k_4 - k_5 = 0, \\ -2k_1 - 2k_5 - 2k_6 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

в которой для ее решения, необходимо задать значения трех параметров. Считаем такими параметрами k_4 , k_5 , k_6 . После решения системы (3) относительно переменных k_1 , k_2 и k_3 , окончательно имеем

$$k_M^{\tau} = \frac{cL^3}{EI}. \quad (4)$$

где EI –изгибная жесткость боковых пород, ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$).

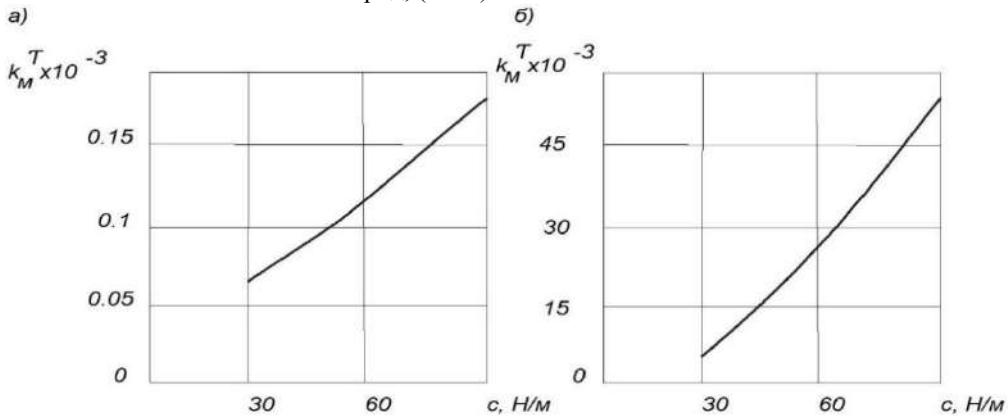


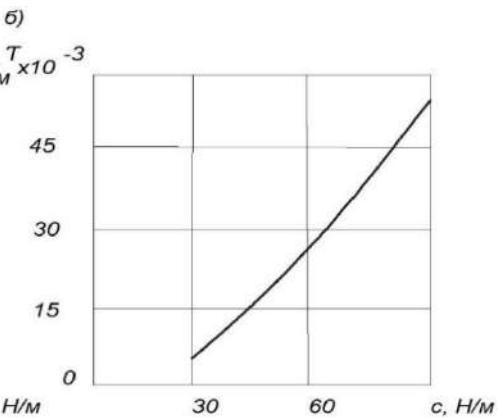
Рис. 4 – Графики изменений коэффициента k_M^{τ} , учитывающего уровень напряженно-деформированного состояния боковых пород в модели от жесткости c , (Н/м) охранного сооружения: а) при охране откаточного штрека надштрековой бутовой полосой (размер в модели $L=0.03$ м); б) при охране закладочным массивом (размер в модели $L=0.2$ м)

Из приведенных зависимостей видно, что минимальные значения исследуемого коэффициента k_M^{τ} соответствуют минимальной жесткости закладочного массива в модели (рис. 4 а, б). При охране выработки надштрековой бутовой полосой, значения коэффициента k_M^{τ} изменяются от $k_M^{\tau} = 0.07 \cdot 10^{-3}$ до $k_M^{\tau} = 0.18 \cdot 10^{-3}$, при увеличении жесткости бутовой полосы в 3 раза, от $c=30\text{Н}/\text{м}$ до $c=90\text{Н}/\text{м}$ (рис. 4 а). При применении закладки выработанного пространства, диапазон изменения исследуемого коэффициента находится в пределах $k_M^{\tau} = (1.8...53) \cdot 10^{-3}$, когда жесткость закладочного массива изменяется с $c=30\text{Н}/\text{м}$ до $c=90\text{Н}/\text{м}$. При этом значение параметра L , (м) в модели, увеличивается (рис.4б).

Полученные результаты исследований указывают на то, что использование в охране

Выражение (4) позволяет оценить влияние закладочного массива на напряженное состояние боковых пород в откаточных штреках с помощью коэффициента k_M^{τ} , зависящего от жесткости охранных сооружений, расположенных над штреком, изгибной жесткости боковых пород и размеров участка пород кровли, поддерживаемого охранным сооружением.

На рис. 4 представлены графики изменений коэффициента k_M^{τ} , учитывающего уровень напряжено-деформированного состояния боковых пород в модели от жесткости охранных сооружений, расположенных над штреком, с учетом размеров поддержания нависающей толщи в углепородном массиве.



участковых подготовительных выработок закладочного массива, размещенного в отработанной части лавы, приводит к снижению отрицательных проявлений горного давления в выработках и уменьшает уровень напряжено-деформированного состояния боковых пород в области откаточного штрека, в сравнении с традиционными способами охраны. Именно за счет изменения параметров L (м) и c (Н/м), входящих в выражение (4), происходит перераспределение напряжений на границе контакта боковых пород с закладочным массивом. Увеличение жесткости закладочного массива, способствует приросту уровня напряжений в кровле и почве угольного пласта. При увеличении площади поддержания пород нависающей толщи закладочным массивом, происходит их плавный прогиб боковых пород по всей длине лавы.

Выводы

Таким образом, знание закономерностей влияния закладочных массивов на напряженное состояние боковых пород в откаточных штреках и особенностей изучаемого процесса, способствует принятию обоснованных решений по применению способов, обеспечивающих эксплуатационное состояние горных выработок и разработке мероприятий, направленных на снижение уровня травматизма от обвалов и обрушений. При разработке угольных пластов крутонаклонного и крутого падения, наличие закладки выработанного пространства над откаточным штреком, оказывает существенное положительное влияние на формирование условий поддержания участковых подготовительных выработок, их сохранность в рабочем состоянии. При этом необходимо учитывать оптимальный гранулометрический состав дробленой породы, влияющий на жесткость охранного сооружения.

Список литературы

1. Жуков, В. Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов / В. Е. Жуков // Уголь Украины. – 2001. – №7. – С. 6-10.
2. Николин, В. И. Снижение травматизма от проявлений горного давления / В. И. Николин, С. В. Подкопаев, А. В. Агафонов, Н. В. Малеев. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 332 с.
3. Шашенко, А. Н. Геомеханика / А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова. – К.: Новый друк, 2016. – 528 с.
4. Викторов, С. Д. Сдвижение и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров. – Москва: Наука, 2005. – 277 с.
5. Селезень, А. Л. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов / А. Л. Селезень, А. Г. Томасов, В. Ф. Андрушко. – М.: Недра, 1977. – 205 с.
6. Зборщик, М. П. Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства / М. П. Зборщик, С. В. Подкопаев // Уголь Украины. – 1992. – № 5. – С. 20-23.
7. Методические указания по изготовлению моделей из оптически чувствительных материалов для исследования проявлений горного давления. – Л.: ВНИМИ, 1970. – 180 с.
8. Хаймова-Малькова, Р. И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом / Р. И. Хаймова-Малькова. – М.: Наука, 1970. – 194 с.
9. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Гере. – СПб.: «Лань», 2002. – 672 с.
10. Баклашов, И. В. Деформируемость и разрушение породных массивов / И. В. Баклашов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
11. Тирский, Г. А. Анализ размерностей / Г. А. Тирский // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 6. – С. 82-87.
12. Бриджмен, П. В. Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
13. Циглер, Ф. Механика твердых тел и жидкостей / Ф. Циглер. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2002. – 912 с.
14. Atanackovic, T. M. Theory of Elasticity for Scientists and Engineers / T. M. Atanackovic, A. Guran. – Springer Science Business Media New York, 2000. – XII. – 374 p.
15. Boresi, A. P. Elasticity in Engineering Mechanics / A. P. Boresi, K. P. Chong, J. D. Lee. – John Wiley & Sons, 2010. – 654 p.
16. Gould, P. L. Introduction to Linear Elasticity / P. L. Gould. – Springer, 2013. – 346 p.

References (transliterated)

1. Zhukov, V. Ob odnoy strategicheskoy oshibke v razreshenii problemy razrabotki krutikh plastov [About one strategic mistake in resolving the problem of developing steep seams] Coal of Ukraine, 2001, 7, 6-10.
2. Nikolin, V. I., Podkopaev, S. V., Agafonov, A. V., Maleev, N. V. Snizhenie travmatizma ot projavlenij gornogo davlenija [Injury Reduction of manifestations of rock pressure], Donetsk, Ukraine, 2005, 332.
3. Shashenko, A. N., Pustovoitenko V. P., Sdvizhikova E. A. Geomechanika [Geomechanics]. K.: New druk, 2016, 528.
4. Viktorov, S., Iofis, M., Goncharov, S. Sdvizheniye i razrusheniye gornykh porod [Sliding and rock destruction]. Moscow: Nauka, 2005, 277.
5. Seleznen, A., Tomasov, A., Andrushko, V. Podderzhaniye podgotovitel'nykh vyrobok pri razrabotke krutikh plastov [Maintenance of preparatory workings in the development of steep formations]. Moscow: Nedra, 1977, 205.
6. Zborshchik, M., Podkopaev, S. Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovli v lavakh pri primeneniye zakladki vyrobottannogo [The mechanism of increasing the stability of the roof in the pits when using the laying of a goaf]. Coal of Ukraine, 1992, 5, 20-23.
7. Metodicheskie ukazaniya po izgotovleniju modeley iz opticheski chuvstvitel'nyh materialov dlja issledovanija projavlenij gornogo давления [Guidelines for the manufacture of models of optically sensitive materials for the study of manifestations of rock pressure]. Lviv: VNIMI, 1970, 180.
8. Haimova-Mal'kova, R. I. Metodika issledovanija naprjazhenij poljarizacionno-opticheskim metodom [The method of studying stresses by the polarization-optical method], Nauka, 1970, 194.
9. Timoshenko, S., Gere, J. Mekhanika materialov [Mechanics of Materials], St. Petersburg: "Doe", 2002, 672.
10. Baklašov, I. Deformiruyemost' i razrusheniye porodnykh massivov [Deformability and destruction of rock masses] Moscow: Nedra, 1988, 271.
11. Tirsky, G. Analiz razmernostey [Dimensional Analysis]. Soros Educational Journal, 2001, 7, 6, 82-87.
12. Bridgman, P. Analiz razmernostey [Dimension Analysis]. Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001, 148.
13. Ziegler, F. Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey [Mechanics of solids and liquids]. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic mechanics", 2002, 912.
14. Atanackovic, T. M., Guran, A. Theory of Elasticity for Scientists and Engineers. Springer Science Business Media New York, 2000, XII, 374.
15. Boresi, A. P., Chong, K. P., Lee, J. D. Elasticity in Engineering Mechanics. John Wiley & Sons, 2010, 654.
16. Gould, P. L. Introduction to Linear Elasticity. Springer, 2013, 346.

Сведения об авторах (About the Authors)

Кіпко Александр Ернестович – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Покровск, Украина; ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: oleksander.kipko@donntu.edu.ua.

Aleksander Kipko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine, ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: oleksander.kipko@donntu.edu.ua.

Гого Владимир Бейлович – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Покровск, Украина, ORCID: 0000-0002-2239-4042; e-mail: volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua.

Vladimir Gogo – Doctor of Technical Sciences, Professor Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2239-4042; e-mail: volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua.

Чепига Дарья Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры Разработка месторождений полезных ископаемых, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: daria.chepiga@donntu.edu.ua.

Daria Chepiga – Candidate of Technical Sciences, Professor Public higher education institution Donetsk National Technical University, associate professor of Development of mineral deposits Department, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: daria.chepiga@donntu.edu.ua.

Симонова Юlia Ігоревна – аспирант кафедры Разработка месторождений полезных ископаемых, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Покровск, Украина; ORCID: 0000-0002-9192-7850; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

Yuliia Simonova – postgraduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9192-7850; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Подкопаев Евгений Сергеевич – инженер, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Покровск, Украина; e-mail: eng.ep@seznam.cz.

Yevgen Podkoryayev – engineer, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: eng.ep@seznam.cz.

Бойченко Геннадий Эдуардович – директор ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», Покровск, Украина; e-mail: ge.boychenko@gmail.com.

Hennadii Boichenko – Director of Svyato-Pokrovskaya Mine 3, LLC, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: ge.boychenko@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кіпко А. Е. Закономірності впливу закладочних масивів на напружене становище бокових пород в откаточних штреках / А. Е. Кіпко, В. Б. Гого, Д. А. Чепіга, Ю. І. Сімонова, Е. С. Подкопаєв, Г. Е. Бойченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 17-24. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.03.

Please cite this article as:

Kipko, O., Gogo, V., Chepiga, D., Simonova, Y., Podkoryayev, Y., Boichenko, H. Regularities of the influence of laying arrays on the stressed state of the lateral rocks in the rolling shafts. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 17-24, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.03.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кіпко, О. Е. Закономірності впливу закладочних масивів на напруженій стан бічних порід у відкотних штреках / О. Е. Кіпко, В. Б. Гого, Д. А. Чепіга, Ю. І. Сімонова, Е. С. Подкопаєв, Г. Е. Бойченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 17-24. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.03.

АННОТАЦІЯ Метою досліджень є визначення на оптических моделях, що імітують вуглепородний масив з виробками, закономірності розподілу напружень в бічних породах при охороні відкотних штреків закладочним масивом. У роботі використовується комплексний метод, що включає аналіз та узагальнення умов охорони та підтримки дільничних підготовчих виробок при розробці крутонахилених і крутих вугільних пластів, фізичне моделювання з оптическими матеріалами і обробку експериментальних даних. В результаті виконаних досліджень стійкості дільничних підготовчих виробок, при їх охороні податливими спорудами, встановлено вплив закладного масиву на напруженій стан бічних порід. Працівниками Державтогінспектії зафіксовано, що зі збільшенням жорсткості надштрекової охоронної смуги з роздробленої породи обмежені розміри, найбільші дотичні напруження концентруються в області контуру виробки і біля верхньої межі бутової смуги. Розміщення закладного масиву в відпрацьованій частині лави, на висоту поверху, забезпечує плавний прогин бічних порід всією площею виробленого простору і рівномірний розподіл напруженій у бічних породах. Напруженено-деформований стан бічних порід у вуглепородному масиві, що вміщає вироблення, залежить від жорсткості охоронних споруд, фізико-механічних властивостей бічних порід і довжини ділянки в породах покрівлі, який підтримується охоронним спорудами. Вплив закладного масиву на напруженій стан бічних порід, оцінюється за допомогою коефіцієнта, що враховує рівень концентрації напруженій в породах покрівлі та грунту пласта, величина якого залежить від жорсткості охоронних споруд, розташованих над штреком, згинальної жорсткості бічних порід і довжини ділянки в породах покрівлі, який підтримується охоронним спорудами. В умовах глибоких шахт, при розробці крутонахилених і крутих вугільних пластів, експлуатаційний стан дільничних підготовчих виробок, коли для їх охорони використовуються надштрекові бутові смуги або закладка виробленого простору при веденні очисних робіт, забезпечується з урахуванням оптимального гранулометричного складу роздробленої породи, що впливає на величину жорсткості охоронної споруди.

Ключові слова: гірничий тиск; обвалення; згинальні коливання; динамічні навантаження; податлива опора; закладка виробленого простору

Поступила (received) 02.10.2019

ОБ ЕФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА НАГРУЗОК НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Ф. И. ЛУХТУРА*, М. В. МЕДВЕДЕВА

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА

*e-mail: lukhelena@yandex.ru

АННОТАЦИЯ Рассмотрены практические приложения полученных ранее теоретических результатов по применению импульсного (циклического) подключения насосов, работающих на сеть, для покрытия существенно переменных нагрузок насосной станции. Проведен анализ эффективности работы насосных станций с различными блоками насосных установок и параметрами систем водоснабжения при переменных нагрузках на основе анализа разработанной математической динамической модели системы производства и распределения рабочей среды (воды). Полученная инженерная теория послужила основой для разработки алгоритмов оптимизации системы ступенчатого регулирования подачи нагнетателей путем их перевода на холостой ход, в т.ч. глубоким дросселированием, или с полным отключением приводного двигателя, на переменных режимах работы насосной станции при покрытии неравномерных графиков ее нагрузок с оценкой затрат потребляемой энергии, с целью повышения экономической эффективности и выбора определенного состава насосного оборудования в предлагаемых режимах. Определены эффективные значения длительности импульсов подачи рабочей среды агрегатами насосной станции и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, при использовании различных блоков насосного оборудования. При этом важной характеристикой надежности системы «электропривод-насос» является частота циклов, лимитирующая число регламентированных включений электродвигателей соответствующей мощности. Показано существенное влияние перечисленных факторов и указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подключения нагнетателей и интенсивность подачи энергоносителя при переменных нагрузках. Характерно, что при сравнении различных режимов импульсной подачи (с холостым ходом и без) более предпочтительным режимом является режим с полным отключением насосов от сети. При этом эффективность растет с ростом числа эксплуатируемых агрегатов и достигает 15% по сравнению с традиционным способом подачи рабочей среды для покрытия переменных нагрузок станции. Полученные результаты также могут быть полезны для решения оптимизационных задач при работе насосной станции на переменных режимах при покрытии ее годовых графиков нагрузок. Данный подход и представленные решения могут быть распространены на другие классы нагнетательных станций с компрессорами или вентиляторами, использующие в качестве рабочей среды газ, для покрытия неравномерных нагрузок нагнетательных станций.

Ключевые слова: графики нагрузок; насосная станция; насос; рабочая среда; энергия; аккумулятор; импульсное (циклическое, ступенчатое) регулирование; эффективность

ABOUT THE EFFICIENCY OF PULSE SUPPLYING OF THE WORKING ENVIRONMENT FOR COVERAGE THE DAILY SCHEDULE OF A PUMPING STATION LOADS

F. LUKHTURA, M. MEDVEDIEVA

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT Practical applications of previously obtained theoretical results on the use of pulsed (cyclic) connection of pumps operating on a network to cover substantially variable loads of a pumping station are considered. The analysis of the efficiency of pumping stations with various units of pumping units and the parameters of water supply systems at variable loads based on the analysis of the developed mathematical dynamic model of the production and distribution of the working medium (water) is carried out. The resulting engineering theory also served as the basis for the development of algorithms for optimizing the system of stepwise regulation of the supply of superchargers by transferring them to idle speed, including deep throttling, or with a complete shutdown of the drive motor, at variable pump station operating conditions when covering uneven load schedules with an estimate of the energy consumption, in order to increase economic efficiency and select a specific pump equipment in the proposed modes. It is determined, that depending on the capacity of the network and storage devices, the amount of fluid consumption and regulation modes and rational layout of pumping equipment with minimizing energy consumption. The effective values of the duration of the pulses of the supply of the working medium by the units of the pumping station and the pause between pulses, as well as the duty cycle of the pulses using various blocks of pumping equipment, are estimated. An important characteristic of the reliability of the "electric drive-pump" system is the frequency of cycles that limit the number of regulated starts of electric motors of the corresponding power. The significant influence of the listed factors and the specified functional parameters on the characteristics of the pulse connection of the superchargers and the intensity of the energy supply at variable loads is shown. It is characteristic that when comparing different pulse supply modes (with and without idle), the more preferable mode is the mode with the pumps completely disconnected from the network. At the same time, the efficiency increases with the increase in the number of operating

units and reaches 15% in comparison with the traditional way of supplying a working medium to cover the variable loads of the station. The results obtained can also be useful for solving optimization problems during the operation of a pumping station in variable modes when covering its annual load schedules. This approach and the solutions presented can be extended to other classes of injection stations with compressors or fans that use gas as a working medium to cover the uneven loads of the injection stations.

Keywords: load schedules; pump station; pump; working medium; energy; battery; pulse (cyclic; step) regulation; efficiency.

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье вопросов определяется возросшим значением энергоэффективности и оптимизации системы подачи и распределения (СПР) рабочей среды (сжатого газа и жидкости), требующие развития действующих и создания новых высокоэффективных систем для промышленных предприятий и коммунального хозяйства, которым в современных условиях хозяйствующие субъекты и общество в целом отводят первостепенную роль. В связи с ростом цен на электроэнергию и, как следствие, увеличением издержек насосных станций (НС), связанных с оплатой электроэнергии, вопрос эффективного и рационального использования энергетических ресурсов на НС становится крайне актуальным. К тому же, повышение энергоэффективности НС является перспективным направлением снижения энергопотребления. Для снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации системы подачи и распределения (СПР) рабочей среды и НС в целом, т.к. насосные станции, как один из основных структурных элементов СПР, во многом определяют ее эксплуатационные и экономические показатели работы.

В работах [1–27] представлены решения многообразных оптимизационных задач, связанных как с насосными, так и другими нагнетательными станциями для транспортировки различных рабочих сред. Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления, агрегаты насосной станции (НС) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии. Решение задачи снижения энергозатрат на НС с предварительным построением математической модели системы СПР методами математического программирования представлены в публикациях [5–10].

Проведенный анализ существующей практики совершенствования СПР-системы позволил выявить ее некоторые недостатки:

1. В существующих инженерных инструментариях все элементы системы СПР рассматриваются по отдельности, без учета взаимного влияния НС и потребителей, обусловленного наличием технологических связей.

2. Недостаточная информированность математических моделей относительно каждого агрегата и оптимального соотношения их комплектов в случае регулирования переменной нагрузки, в т.ч. пиковой, и влияния на энергетическую характеристику всей НС.

Кроме того, по существующим оценкам, до 50% энергозатрат НС-систем могут быть снижены за счет изменения состава оборудования НС и способов управления ими. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов при существующих переменных нагрузках является оптимизация состава и режимов работы оборудования. Она может производиться по следующим направлениям:

- выбор оптимального числа эксплуатируемых агрегатов;
- оптимального распределения нагрузки между ними;
- оптимизация работы установок с использованием циклического (ступенчатого) их подключения при работе на сеть [1–4, 26] и др.
- рациональное построение СПР рабочей среды для покрытия переменных нагрузок НС.

Совокупность указанных факторов является основанием для постановки задачи оптимизации параметров НС в условиях неопределенности и неравномерности фактических расходов. Поэтому представляется актуальным совершенствование методологий, разработка моделей и комплексов, позволяющих оптимизировать параметры и состав оборудования НС. Определение в пределах НС оптимального числа и типа агрегатов с учетом расчетной подачи, обеспечит анализ вариантов различных технологических схем для покрытия переменной нагрузки НС. Полученные результаты могут быть интегрированы в общую задачу определения оптимальной работы НС и СПР в целом.

СПР (с комплексом энергетического оборудования) производит столько продукции [27], сколько требуют в данный момент потребители, определяющие нагрузку НС – количество энергоресурса, вырабатываемое станцией в данный момент. Этим определяются и характер работы насосных станций (НС), и др., и их графики нагрузок – изменение вырабатываемой нагрузки во времени. Обычно изменение вырабатываемой продукции или потребляемой электрической нагрузки во времени представляется графически. В зависимости от отрезка времени, различают суточные, недельные, сезонные (лето, зима и т.д.) и годовые графики. Они служат для выбора состава оборудования при проектировании станций, определения текущих и годовых технико-экономических показателей, распределения нагрузок и установления оптимальных режимов работы оборудования. Особенно большое значение для выбора режимов работы и эксплуатации оборудования станций имеют суточные графики нагрузок [27] (рис.1). Последние, а значит, и графики потребления электроэнергии отличаются значительной неравномерностью. Объясняется она

неодинаковым режимом потребления рабочей среды (продукции НС) разными группами потребителей: коммунальными хозяйствами, промышленными потребителями и др. Нагрузка Q непрерывно изменяется, достигая в определенные моменты наибольшей (Q_{max}) и наименьшей (Q_{min}) величины. На этом основании его разбивают на три зоны [27]: пиковая, полупиковая и базовая.

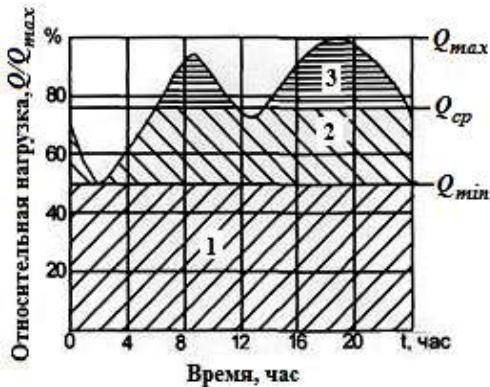


Рис. 1 – Суточний график производства продукции (сжатого газа или жидкости) и/или потребления электроэнергии нагнетательной станцией
1–базовая нагрузка; 2–полупиковая нагрузка;
3–пиковая нагрузка

График является обычно двугорбым, т.е. имеет два пика – утренний (примерно в 6–8 часов) и вечерний (в 16–20 часов) максимумы нагрузок из-за резкого увеличения потребления. Ночной провал нагрузок связан с резким снижением потребления населения, и может сохраняться только нагрузка предприятий с непрерывным циклом, подключенных к системе СПР. Провал потребления нагрузки наблюдается в 12–14 часов в основном в связи со снижением коммунально-бытовой нагрузки. В эти периоды времени нагрузка на НС снижается настолько, что агрегаты могут быть выведены в глубокое дросселирование или из работы. В зависимости от времени года, от дней недели, от снабжения потребителей различными видами продукции, от метеорологических факторов, состояние магистральных сетей и др. суточные графики нагрузки видоизменяются. Вследствие изменения объемов производства по мере суточного потребления, агрегаты нагнетательной станции (НС) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу электроэнергии. Максимум КПД, как правило, наблюдается менее 50% времени. Поэтому вопросы регулирования насосной станции, и ее экономичность имеют большое значение. Способы регулирования (применяемые для всех типов машин) различные [26–27]. Не перечисляя известные методы, обратим внимание на способ периодического отключения или перевода

нагнетателя на режим холостого хода, на так называемое циклическое (импульсное) регулирование [26]. Последний способ предложен в [1–2] для регулирования ступенчатого регулирования винтовых компрессоров и широко распространен. В этом случае нагнетатели, обычно оснащаются системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности путем автоматического перевода нагнетателя на холостой ход [1–4]. Незначительным недостатком предложенного способа является полученное предлагаемой инженерной теорией линейное изменение давления в системе во времени прохождения фаз холостого хода и нагнетания, что противоречит физическим основам этих процессов в предлагаемых условиях.

Для насосных установок с циклическим регулированием подачи жидкости при периодическом отключении насосов такая теория разработана в публикации [26], где проведен глубокий анализ динамики такого импульсного регулирования.

Цель работы

На основе ранее разработанной физической модели рабочего процесса [26] и ее анализе для установок НС с циклическим (импульсным) подводом рабочей среды к системе водоснабжения представить практическое обоснование эффективности такой подачи рабочей среды при переменных суточных графиках нагрузок. Разработать оптимальные варианты при выборе состава насосного оборудования НС для покрытия, как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта рабочей среды и улучшение работы НС, в т.ч. для перспективных проектов.

Изложение основного материала

В связи с существующим в настоящее время основным требованием, предъявляемым к насосным станциям – обеспечение высокого уровня энергоэффективности и надежности в условиях глубоко переменных режимов работы НС, возникает необходимость одновременно с изменением характеристики сети изменять и параметры НС. Последнее достигается ее управлением. Задачей управления НС является обеспечение режимов НС, необходимых по условиям эксплуатации, максимально рациональным путем в зависимости от принимаемых критериев.

Расход рабочей среды, согласно графику нагрузки станции, в каждый заданный момент времени определяется системой потребления, и его можно считать условно объективным, он не поддается корректировке без ущерба для потребителей. Значит, согласования вырабатываемого количества рабочей среды, и его расходы потребителю следует

осуществлять за счет изменения рабочих параметров НС, т. е. настройки системы СПР за счет влияния на насосы НС. Одним из способов регулирования подачи насосов НС является перевод насосов на циклический режим эксплуатации. Циклическую подачу можно осуществлять разными методами регулирования: переводом на холостой ход или остановом насоса, частотным регулированием подачи, дросселированием и др. При этом необходима адаптация того или иного метода регулирования под предлагаемую методику циклической подачи. Также необходимо наличие достаточно ёмких аккумуляторов.

В соответствии с представленной в работе [26] теорией импульсной подачи рабочей среды на насосных станциях, была разработана методика расчета, которая по определенному алгоритму позволяет определить регулировочные характеристики насосной станции для покрытия суточного графика нагрузок на различных возможных ее вариантах работы. Эта методика позволяет вычислить для каждого режима потребления продолжительность цикла, фаз нагнетания и холостого хода (или останова), величину скважности и др. при полном отключении насосов во время паузы. При этом в [26] рассматривали СПР (рис. 2) с призматическим баком-аккумулятором объемом V , площадью поперечного сечения F , и начальным напором $H_{нач}$, (или начальным давлением $P_{нач}$), создаваемым напором H (избыточным давлением нагнетания p), с полученным нелинейным его изменением во времени прохождения соответствующих фаз, с суммарной площадью сечения потребления f . Общую систему нагнетания заменили эквивалентным объемом аккумулятора, давление окружающей среды и коэффициенты расхода системы трубопроводов сети принимали постоянными.

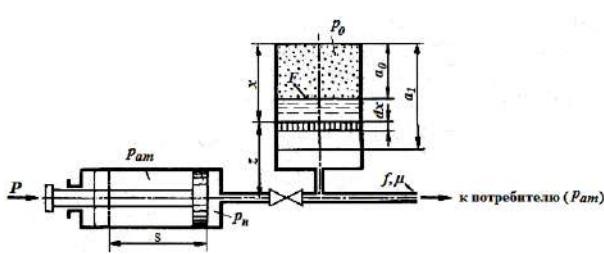


Рис. 2 – Формализованная принципиальная схема СПР рабочей среды

Так продолжительность цикла при полном отключении насосов станции составила

$$\begin{aligned} \tau_u = \tau_{нагн} + \tau_{паузы} &\approx \frac{2F\sqrt{H_{уст}}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \frac{\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} = \\ &= \frac{2V_{нач}}{Q_h} \cdot \frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}}} - 1}{1 - q_{V_{нач..нагн.}}} + \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_h} \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}}{H_{нач}^{паузы}}}}{q_{V_{нач..паузы}}} \approx \\ &\approx \frac{2V_{нач}}{Q_h} \left(\frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}}} - 1}{1 - q_{V_{нач..нагн.}}} + \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}}{H_{нач}^{паузы}}}}{q_{V_{нач..паузы}}} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Время нагнетания

$$\begin{aligned} \tau_{нагн} &= \frac{2F \cdot H_{нач}}{Q_{нач.потр}} \cdot \frac{\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} = \\ &= \frac{2V_{нач}}{Q_h} \cdot \frac{\sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{нач}}} - 1}{1 - q_{V_{нач..нагн.}}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Время отключения подачи

$$\begin{aligned} \tau_{паузы} &= \frac{2F}{\mu \cdot f \sqrt{2g}} \left[\sqrt{H_{нач}^{паузы}} - \sqrt{H_{нач}} \right] = \\ &= \frac{2FH_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}^{паузы}} \left[1 - \frac{\sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{нач}^{паузы}}} \right] = \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}^{паузы}} \left[1 - \frac{\sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{нач}^{паузы}}} \right] = \\ &= \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_{нач.потр}^{паузы}} \left[1 - \frac{q_{V_{нач..нагн.}}}{q_{V_{нач..паузы}}} \right] = \frac{2V_{нач}^{паузы}}{Q_h} \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}}{H_{нач}^{паузы}}}}{q_{V_{нач..паузы}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Скважность процесса

$$\begin{aligned} S &= \frac{\tau_u}{\tau_{нагн}} = \frac{\sqrt{H_{уст}}}{\sqrt{H_{нач}^{паузы}}} \frac{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}}}{\sqrt{H_{уст}} - \sqrt{H_{нач}^{паузы}}} = \frac{\sqrt{\frac{H_{уст}}{H_{нач}} - 1}}{1 - \sqrt{\frac{H_{нач}^{паузы}}{H_{уст}}}} = \\ &= \frac{\frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2g} H_{нач}} - 1}{1 - \frac{Q_{нас}^{паузы}}{Q_{нас}}} = \frac{\frac{Q_{нас}}{Q_{нач.потр}} - 1}{1 - \frac{Q_{нас}^{паузы}}{Q_{нач.потр}}} = \frac{1}{q_{V_{нач..нагн.}}} - 1 = \\ &= \frac{1}{q_{V_{нач..нагн.}}} \frac{1 - q_{V_{нач..нагн.}}}{1 - q_{V_{нач..паузы}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } H_{уст}^{\frac{1}{2}} = \frac{Q_{нас}}{\mu \cdot f \sqrt{2g}};$$

а частота циклов:

$$\omega = \frac{1}{\tau_u} \cong \frac{\mu \cdot f \sqrt{2g}}{2F \sqrt{H_{\text{нач.паузы}}}} \frac{1 - \sqrt{\frac{H_{\text{нач.паузы}}}{H_{\text{уст}}}}}{1 - \sqrt{\frac{H_{\text{нач.наагн}}}{H_{\text{нач.паузы}}}}} = \frac{Q_{\text{нач.потр}}^{\text{паузы}}}{2FH_{\text{нач.паузы}}} \frac{1 - \frac{Q_{\text{нач.потр}}^{\text{паузы}}}{Q_{\text{наагн}}}}{1 - \frac{Q_{\text{наагн}}}{Q_{\text{нач.потр}}^{\text{паузы}}}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{нач.паузы}}$ – величина потребления (расход) в начале паузы; $Q_{\text{наагн}}$ – величина потребления в начале нагнетания; $V_{\text{наагн}}$ и $V_{\text{нач.паузы}}$ – объем жидкости в аккумуляторе в начале и конце процесса нагнетания; $\tau_{\text{наагн}}$, $\tau_{\text{паузы}}$ – длительность процессов подачи и паузы; $\frac{H_{\text{нач.паузы}}}{H_{\text{наагн}}} = \frac{H_{\max}}{H_{\min}}$ – отношение максимальной и минимальной степени повышения напора (давления); $q_V = Q_{\text{потр}} / Q_{\text{наагн}}$ – относительный параметр потребления рабочей среды; V – емкость сети, м³; $Q_{\text{наагн}}$ – номинальная производительность насосов, м³/мин.

Мощность (количество энергии в единицу времени), потребляемую за цикл $\tau_u = \tau_{\text{наагн}} + \tau_{\text{паузы}}$ при условии полного отключения насосов

$$P_u = \frac{P_{\max}}{S} = P_{\max} \cdot \left[q_{V \text{ нач.наагн.}} \frac{1 - q_{V \text{ нач.паузы}}}{1 - q_{V \text{ нач.наагн.}}} \right] \quad (6)$$

При переводе насосов на холостой ход на основе анализа вышеприведенных соотношений можно записать

$$P_u = P_{\max} \left[\frac{1}{S} + k \frac{(S-1)}{S} \right] = \\ = P_{\max} \cdot \left[q_{V \text{ нач.наагн.}} \frac{1 - q_{V \text{ нач.паузы}}}{1 - q_{V \text{ нач.наагн.}}} + \right. \\ \left. + \kappa \left(1 - q_{V \text{ нач.наагн.}} \frac{1 - q_{V \text{ нач.паузы}}}{1 - q_{V \text{ нач.наагн.}}} \right) \right]. \quad (7)$$

Мощность, потребляемая насосами за цикл паузы на холостом ходу, принята равной $P_{x,x} = k \cdot P_{\max}$, где k – коэффициент холостого хода.

При соблюдении указанных в [26] условий, импульсный режим подвода энергии к рабочей среде, как независимый фактор влияния, должен быть более экономичным, чем традиционный (без импульсного) режим регулирования подачи.

Обсуждение результатов

Для доказательства эффективности практического применения режима импульсного подачи рабочей среды при покрытии переменного графика нагрузок в качестве конкретного примера рассмотрена НС, оборудование которой включает десять насосов производительностью $Q_{\text{наагн}} = 10$ м³/мин, номинальной мощностью $N_h = 62$ кВт, системой холостого хода при $k = 0,5$ (и отключения

насосов – $k = 0$) с диапазоном настройки $\frac{H_{\max}}{H_{\min}} = 1,1$ каждый, при максимальной вместимости аккумулятора и сети $V = 200$ м³. Суточный (формализованный) график нагрузки насосной станции и производительность каждого ее насоса приведен на рис. 3. Для упрощения расчета суточный график нагрузки и производительности НС (рис. 1) сведен к линейно-ступенчатому, где число суточных часов разделены на 6 равных интервалов. Величина нагрузки (сплошная полужирная линия) на каждом интервале указаны в поле рисунка в м³/мин. Здесь же поинтервально нанесена по вертикали равномерная разбивка (светлые линии), указывающая единичную производительность насосов станции $Q_{\text{наагн}}$.

При изменении потребления рабочей среды напор в сети изменяется: увеличение потребления вызывает уменьшение напора, а уменьшение потребления, наоборот, повышение напора в соответствии с рабочими характеристиками насосов. Согласно схеме регулирования, датчик давления (напора) превращает импульс в аналоговый или цифровой сигнал, который инициирует работу системы управления НС по алгоритму. При этом предварительно производится настройка датчика на срабатывание при повышении (сигнал "+") и снижении давления (сигнал "-") по сравнению с принятыми величинами H_{\max} и H_{\min} . После выбора определенного варианта система дает управляющий сигнал на включение (или перевода на холостой ход) соответствующих насосов. Система стабилизируется до получения следующего сигнала от датчика давления (или расхода).

При решении этой задачи были приняты следующие основные допущения:

1. КПД насоса при изменении потребления не изменяется, и им пренебрегаем. Мощность потребления уменьшается при уменьшении подачи.

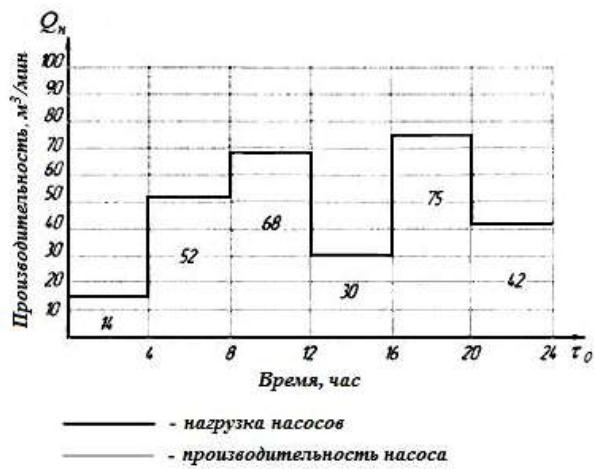


Рис. 3 – Суточный график нагрузки и производительности НС

2. Гидросистема задемпфирована, случайные пульсации давления в системе «гасятся» и датчик давления (напора) не реагирует на них.

3. При обработке сигнала датчика используются современные системы с процессорами – системы автоматической обработки сигнала с прогнозированием продолжительности измененного режима нагрузки.

4. На трудоспособность системы не оказывает влияния время срабатывания системы, складывающееся из времени обработки сигнала, времени алгоритмического анализа и времени пуска (или остановки).

При этом насосы должны быть оснащены системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности насоса по возможности от 0 до 100% путем автоматического перевода его на холостой ход, в т.ч. глубоким дросселированием, или выведены из работы, используя ступенчатое (циклическое) регулирование.

В табл. 1–3 представлены, на основании соотношений (1) – (7), расчеты регулировочных характеристик насосной станции при работе соответственно 10-ти насосов, 8 (2 в резерве) и от 2 до 8 насосов. Работа последних осуществлялась в соответствии со своим графиком суточной нагрузки НС (табл. 3, рис. 3), количество работающих насосов при покрытии соответствующей нагрузки изменялось.

Обозначение параметров в табл. 1–3, пояснение которых отсутствуют в тексте, следующее: количество насосов – z , длительность интервала времени – Δt , мощность потребляемая – $P_{\text{ц}}$, потребляемая энергия за рассматриваемый интервал времени Δt – W_i .

Таблица 1 – Регулировочные характеристики НС при работе 10 насосов

Обозна- чение	Интервал времени суток, час					
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
z	10	10	10	10	10	10
$Q_{\text{н}}$, м ³ /мин	14	52	68	30	75	42
q_v	0,14	0,52	0,68	0,3	0,75	0,42
$\tau_{\text{н}}$, с	12,4	22,2	33,3	15,2	42,6	18,4
$\tau_{\text{паузы}}$, с	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
$\tau_{\text{ц}}$, с	100,1	45,8	51,3	56,2	59,0	47,6
S	8,09	2,06	1,54	3,69	1,38	2,59
ω , 1/час	36	79	70	64	61	76
$P_{\text{ц}}$, кВт	76,7	300,3	401,8	167,9	447,8	239,1
$P_{\text{ц}}$, кВт	348,3	460,1	510,9	394,0	533,9	429,5
Δt , час	4	4	4	4	4	4
W_i , кВт·час	307	1201	1607	672	1791	956
W_i , кВт·час	1393	1841	2044	1576	2136	1718

Таблица 2 – Регулировочные характеристики НС при работе 8 насосов

Расчетный параметр	Интервал времени суток, час					
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
z	8	8	8	8	8	8
$Q_{\text{н}}$, м ³ /мин	14	52	68	30	75	42
q_v	0,175	0,65	0,85	0,375	0,9375	0,525
$\tau_{\text{н}}$, с	16,1	38,0	88,7	21,3	213,0	28,0
$\tau_{\text{паузы}}$, с	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
$\tau_{\text{ц}}$, с	103,9	61,7	106,8	62,3	229,4	57,3
S	6,44	1,62	1,20	2,92	1,08	2,04
ω , 1/час	35	58	34	58	16	63
$P_{\text{ц}}$, кВт	77,0	305,9	412,1	169,7	460,6	242,7
$P_{\text{ц}}$, кВт	286,5	401,0	454,0	332,8	478,3	369,3
Δt , час	4	4	4	4	4	4
W_i , кВт·час	308	1224	1648	679	1842	971
W_i , кВт·час	1146	1604	1816	1331	1913	1477

Таблица 3 – Регулировочные характеристики НС при работе от 2 до 8 насосов

Расчетный параметр	Интервал времени суток, час					
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
z	2	6	7	3	8	5
$Q_{\text{н}}$, м ³ /мин	14	52	68	30	75	42
q_v	0,70	0,87	0,97	0,75	0,94	0,84
$\tau_{\text{н}}$, с	177,5	133,1	532,5	106,5	213,0	133,1
$\tau_{\text{паузы}}$, с	87,8	23,6	18,1	41,0	16,4	29,3
$\tau_{\text{ц}}$, с	265,2	156,7	550,5	147,4	229,4	162,4
S	1,49	1,18	1,03	1,38	1,08	1,22
ω , 1/час	14	23	7	24	16	22
$P_{\text{ц}}$, кВт	83,0	315,9	419,8	179,1	460,6	254,2
$P_{\text{ц}}$, кВт	103,5	344,0	426,9	213,6	478,3	282,1
Δt , час	4	4	4	4	4	4
W_i , кВт·час	332	1264	1679	716	1842	1017
W_i , кВт·час	414	1376	1708	854	1913	1128

Сравнительные данные потребления мощности при циклической работе 10, 8, от 2 до 8 насосов представлены на табл. 1–3 как с полным отключением, так и с переводом насосов на холостой ход. Сравнительные графики суточных потреблений для этих же режимов представлены на основании табл. 4 на рис. 4 и 5. Из рис. 4 видно, что наименьшая величина электроэнергии (7393 кВт·час) в сравнении с остальными вариантами была затрачена при работе от 2 до 8 насосов при переводе насосов на холостой ход при нулевой подаче, при этом уменьшается количество циклов. Наименьшая величина электроэнергии в сравнении с остальными вариантами в случае с полным отключением насосов (рис.5) затрачена при работе 10 насосов в импульсном режиме и составила 6534 кВт · час. При этом частота циклов наибольшая из всех вариантов сравнения.

Для сравнения, работа НС по традиционному способу подачи с отключением насосов (без наличия объемного реципиента) и эксплуатации насосов от 2 до 8 приводит к суммарной потребляемой мощности 7688 кВт·час в сутки.

Таблица 4 – Сравнительный анализ суточных потреблений энергии (мощности) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов при различных вариантах импульсного режима

Вариант-количество насосов	Режим с полным отключением насосов		Режим с переводом на ХХ	
	W_i , кВт·час	ω , 1/час	W_i , кВт·час	ω , 1/час
10	10707	64,23	6534	64,23
8	9288	43,85	6672	43,85
2-8	7393	17,56	6850	17,56

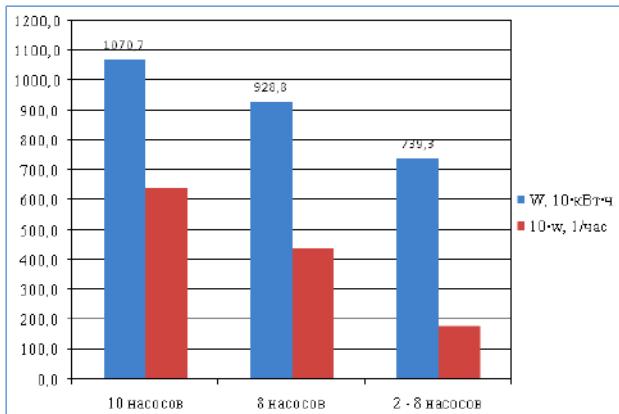


Рис. 4 – Сравнительный анализ суточных потреблений электроэнергии (мощности) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов на импульсном режиме с переводом насосов на холостой ход

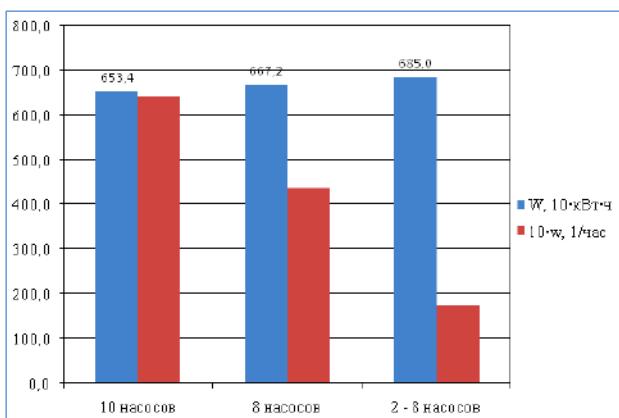


Рис. 5 – Сравнительный анализ суточных потреблений электроэнергии (мощностей) и циклов при работе 2÷8, 8, 10 насосов на импульсном режиме с полным отключением насосов

В импульсном режиме с переходом на ХХ выгодным режимом при наличии аккумулирующей емкости является лишь режим с эксплуатацией насосов от 2 до 8. При этом снижение потребления

энергии по сравнению с традиционным составляет чуть менее 4%. Более выгодны режимы всех трех вариантов с импульсной подачей и полным отключением насосов (с наличием реципиента). Наиболее эффективен при этом режим с эксплуатацией 10 насосов с наименьшей частотой импульсов, что подтверждает практически полученные теоретические выводы в работе [26]. При этом разница в эффективности этих трех вариантов составляет лишь 4,6÷4,8%. Кроме того, снижение потребления по сравнению с традиционным способом составляет 10-15%, что существенно.

Таким образом, покрытие суточного графика нагрузок станции более выгодно осуществлять с использованием импульсного режима. Отрицательным моментом такого регулирования может быть лимитирование этого процесса числом «останова – пуска» приводных электродвигателей насосов, которые вносят некоторое ограничение в частотные характеристики импульсов. Этот момент, возможно, может быть обойден подбором параметрических характеристик импульсного регулирования.

В заключении можно отметить, что полученные результаты с успехом может использоваться техническими работниками при выборе оптимальной эксплуатационной схемы работы агрегатов (насосов) для покрытия графиков нагрузок в короткие сроки без использования сложных вычислительных программных комплексов. Такой подход позволяет минимизировать средний удельный расход электроэнергии и др. Кроме того, эту методику можно использовать для оптимизации работы насосной станции при покрытии ее нагрузки в любой момент времени, а также суточных, сезонных, годовых нагрузок и др.

Выводы

Впервые в отечественной практике предпринята попытка создания модели управления насосами НС с существенно переменным режимом работы при использовании циклической подачи рабочей среды.

Полученные результаты расчета функциональных параметров импульсного подвода энергии к системам водоснабжения позволяет осуществлять выбор более эффективных конструктивных их характеристик и состава оборудования НС, в т.ч. при проектировании систем водоснабжения.

На упрощенных примерах с известным графиком нагрузки НС выполнена численная реализация динамической модели импульсного регулирования насосов, получены результаты в виде таблиц и указаны наиболее рациональные комбинации насосов для оптимального режима работы НС.

Результаты данной работы могут послужить первым этапом в создании моделей управления

нагнетательных станций различного назначения и разной структуры с последующей интеграцией их в системы АСУТП.

При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет неучтенных в работе рабочих характеристик насосов и сети при различных интенсивностях импульсного подвода, что позволит получить более полную картину и разработать более эффективные методы импульсного подачи рабочего тела в системы водоснабжения, в т.ч. для покрытия переменных нагрузок. Целесообразным являются последующие уточнения, которые могут быть сделаны на более совершенных моделях с использованием ЭВМ, что позволит получить более точные и эффективные методики для оптимизации работы НС в системах водоснабжения.

С использованием представленной аналитической (технико-экономической) модели системы нагнетания жидкостей в сеть при переменных нагрузках определены основные параметры, влияющие на состав (долю) и режимы подключения нагнетателей для покрытия нагрузок в пиковой, полуpikeвой и базовой частях суточного графика нагрузок.

Список литературы

1. Бондаренко, Г. А. Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров переводом на холостой ход / Г. А. Бондаренко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2003. – №3 (49). – С. 63-71.
2. Бондаренко, Г. А. Некоторые особенности работы компрессоров на пневмосеть / Г. А. Бондаренко, В. В. Шишов // Проектирование и моделирование. Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 62-65.
3. Бондаренко, Г. А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / Г. А. Бондаренко, П. Е. Жарков. – Сумы: Изд-во СумГУ. – 2003. – 130 с.
4. Бондаренко, Г. А. Винтовые воздушные компрессорные станции / Г. А. Бондаренко. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2003.– 245 с.
5. Крюков, О. В. Комплексная оптимизация энергопотребления агрегатов компрессорных станций / О. В. Крюков // Газовая промышленность. – 2013. – С. 30-33.
6. Стогней, В. Г. Оптимизация режимов работы компрессорных станций промышленных предприятий: учеб. пособие / В. Г. Стогней, А. В. Бараков. – Воронеж: Воронеж. политехн. ин-т, 1987. – 87 с.
7. Кочкин, П. А. Методы повышения эффективности работы компрессорных станций / П. А. Кочкин, И. Н. Мухин // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2009. – № 3(23).
8. Штейнмиллер, О. А. Статическая и полирежимная оптимизация параметров насосного оборудования системы «районная насосная станция – абонентская сеть» / О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2 (19). – С. 41-45.
9. Штейнмиллер, О. А. Численные методы решения задачи оптимального синтеза повышительных систем подачи и распределения воды микрорайона / О. А. Штейнмиллер // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 4 (21). – С. 81-87.
10. Сумароков, С. В. Математическое моделирование систем водоснабжения / С. В. Сумароков. – Новосибирск : Наука, 1983. – 167 с.
11. Турк, В. И. Насосы и насосные станции / В. И. Турк. – М. : Стройиздат, 1976. – 304 с.
12. Шевелев, Ф. А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран / Ф. А. Шевелев, Г. А. Орлов. – М. : Стройиздат, 1987. – 347 с.
13. Штейнмиллер, О. А. Задача оптимального синтеза повышительных систем подачи и распределения воды (СПРВ) микрорайона / О. А. Штейнмиллер, А. Н. Ким // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 1 (18). – С. 80-84.
14. Евдокимов, А. Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями / А. Евдокимов. – Харьков : Вища школа, 1985 – 288 с.
15. Евдокимов, А. Оптимальные задачи на инженерных сетях / А. Евдокимов. – Харьков : Вища школа, 1976. – 153 с.
16. Копытин, А. Н. Современные подходы в определении эффективности работы насосных агрегатов / А. Н. Копытин, О. Ю. Царинник // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2007. – № 8. – С. 14-16.
17. Костин, В. И. Регулирование производительности нагнетателей при смешанной схеме совместной работы / В. И. Костин // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск, 2006. – № 6. – С. 61-64.
18. Абрамов, Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1972. – 288 с.
19. Sarbu, I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems / I. Sarbu, I. Borza // Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. – 1998. – Vol. 42, № 2. – P. 141-152.
20. Gevorkov, L. PLC-based flow rate control system for centrifugal pumps / L. Gevorkov, V. Vodovozov, T. Lehtla, I. Bakman // 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 14-15 Oct. 2015. Riga, Latvia. – 2015. – doi: 10.1109/RTUCON.2015.7343115.
21. Tamminen, J. Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements / J. Tamminen, T. Ahonen, A. Kosonen, J. Ahola, J. Tolvanen // 16th European Conference on Power Electronics and Applications, 26-28 Aug. 2014. Lappeenranta, Finland. – 2014. – doi: 10.1109/EPE.2014.6910988.
22. Annus, I. Pumps Energy Consumption Based on New EU Legislation / I. Annus, D. Uibo, T. Koppel // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 89. – P. 517-524. – doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.473.
23. Vodovozov, V. Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal electricity consumption / V. Vodovozov, L. Gevorkov, Z. Raud, // 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 4-6 April 2017. Cadiz, Spain. – 2017. – doi: 10.1109/CPE.2017.7915193.
24. Almeida, A. T. Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU / A. T. Almeida, P. Fonseca, H. Falkner, P. Bertoldi // Energy Policy. – 2003. – Vol. 31. – P. 563-575. – doi: 10.1016/S0301-4215(02)00100-3.

25. Ahonen, T. Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State / T. Ahonen, J. Tamminen, J. Ahola, J. Kestilä // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2012. – Vol. 59. – P. 4803-4809. – doi: 10.1109/TIE.2011.2176692.
26. Лухтура, Ф. І. О применении импульсной подачи рабочей среды в системы водоснабжения / Ф. І. Лухтура, М. В. Медведева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 48-57. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.07.
27. Лухтура, Ф. І. О повышении эффективности работы нагнетательных станций / Ф. І. Лухтура, Н. В. Карнаух, М. В. Медведева, В. Ю. Ивашин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. 37. – С.61-74. – doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160239.
9. Shteynmiller, O. A. Chislennye metody resheniya zadachi optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody mikrorayona [Numerical methods for solving the problem of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems in a microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 4 (21), 81-87.
10. Sumarokov, S. V. Matematicheskoye modelirovaniye sistem vodosnabzheniya [Mathematical modeling of water supply systems]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 167.
11. Turk, V. I. Nasosy i nasosnyye stantsii [Pumps and pumping stations]. Moscow, Stroyizdat, 1976, 304.
12. Shevelev, F. A., Orlov, G. A. Vodosnabzheniye bol'shikh gorodov zarubezhnykh stran [Water supply of large cities of foreign countries]. Moscow, Stroyizdat, 1987, 347.
13. Shteynmiller, O. A., Kim, A. N. Zadacha optimal'nogo sinteza povysitel'nykh sistem podachi i raspredeleniya vody (SPRV) mikrorayona [The task of optimal synthesis of upgrading water supply and distribution systems (SPRV) of the microdistrict]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 1 (18), 80-84.
14. Yevdokimov, A. Minimatsiya funktsiy i yeye prilozheniya k zadacham avtomatizirovannogo upravleniya inzhenernymi setyami [Minimization of functions and its application to the tasks of automated management of engineering networks]. Kh.: Vishcha shkola, 1985, 288.
15. Yevdokimov, A. Optimal'nyye zadachi na inzhenernykh setyakh [Optimal problems on engineering networks]. Khar'kov, Vishcha shkola, 1976, 153.
16. Kopytin, A. N., Tsarinnik, O. Yu. Sovremennyye podkhody v opredelenii effektivnosti raboty nasosnykh agregatov [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye [Plumbing, heating, air conditioning]*, 2007, 8, 14-16.
17. Kostin, V. I. Regulirovaniye proizvoditel'nosti nagnetateley pri smeshannoy skhemе sovmestnoy raboty [Regulation of supercharger performance with a mixed scheme of joint work]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of universities. Building]*. Novosibirsk, 2006, 6, 61-64.
18. Abramov, N. N. Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody [Theory and method of calculating water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat, 1972, 288.
19. Sarbu, I., Borza, I. Energetic optimization of water pumping in distribution systems. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 1998, 42, 2, 141-152.
20. Gevorkov, L., Vodovozov, V., Lehtla, T., Bakman, I. PLC-based flow rate control system for centrifugal pumps. 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 14-15 Oct. 2015. Riga, Latvia, 2015, doi: 10.1109/RTUCON.2015.7343115.
21. Tamminen, J., Ahonen, T., Kosonen, A., Ahola, J., Tolvanen, J. Variable speed drive-based pressure optimization of a pumping system comprising individual branch flow control elements. *16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 26-28 Aug. 2014. Lappeenranta, Finland, 2014, doi: 10.1109/EPE.2014.6910988.
22. Annus, I., Uibo, D., Koppel, T. Pumps Energy Consumption Based on New EU Legislation. *Procedia Engineering*, 2014, 89, 517-524, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.473.
23. Vodovozov, V., Gevorkov, L., Raud, Z. Circulation centrifugal pump with variable speed drives and minimal

References (transliterated)

1. Bondarenko, G. A. Inzhenernaya teoriya regulirovaniya vintovykh kompressorov perevodom na kholostoy khod [Engineering theory of regulation of screw compressors by transfer to idle]. *Vіsnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu [The Sumy State University Bulletin]*, 2003, 3 (49), 63-71.
2. Bondarenko, G. A., Shishov, V. V. Nekotorye osobennosti raboty kompressorov na pnevmoset' [Some features of the operation of compressors on the pneumatic network]. *Proyektirovaniye i modelirovaniye. Kompressornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye [Design and modeling. Compressor and power engineering]*, 2008, 1 (11), 62-65.
3. Bondarenko, G. A., Zharkov, P. E. Vintovyye kompressory v sistemakh obespecheniya szhatym vozdukhom [Screw compressors in compressed air supply systems]. Sumy, Izd-vo SumGU, 2003, 130.
4. Bondarenko, G. A. Vintovyye vozдушnyye kompressornyye stantsii [Screw air compressor stations]. Sumy, Izd-vo SumGU, 2003, 245.
5. Kryukov, O. V. Kompleksnaya optimizatsiya energopotrebleniya agregatov kompressornykh stantsiy [Integrated optimization of energy consumption of compressor station units]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2013, 30-33.
6. Stogney, V.G., Barracks, A. V. Optimizatsiya rezhimov raboty kompressornykh stantsiy promyshlennyykh predpriyatiy: ucheb. posobiye [Optimization of operating modes of compressor stations of industrial enterprises: studies. manual]. Voronezh, Voronezh. politekhn. in-t, 1987, 87.
7. Kochkin, P. A., Mukhin, I. N. Metody povysheniya effektivnosti raboty kompressornykh stantsiy [Methods to improve the efficiency of compressor stations]. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti [Informatization and control systems in industry]*, 2009, 3(23).
8. Shteynmiller, O. A., Kim, A. N. Staticheskaya i polirezhimnaya optimizatsiya parametrov nasosnogo oborudovaniya sistemy «rayonnaya nasosnaya stantsiya – abonentskaya set» [Static and multi-mode optimization of the parameters of the pumping equipment of the system “district pumping station – subscriber network”]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2009, 2 (19), 41-45.

- electricity consumption. *11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 4-6 April 2017*. Cadiz, Spain, 2017, doi: 10.1109/CPE.2017.7915193.
24. Almeida, A. T., Fonseca, P., Falkner, H., Bertoldi, P. Market Transformation of Energy-Efficient Technologies in the EU. *Energy Policy*, 2003, **31**, 563-575, doi:10.1016/S0301-4215(02)00100-3.
25. Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J., Kestilä, J. Frequency-Converter-Based Hybrid Estimation Method for the Centrifugal Pump Operational State. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**, 4803-4809, doi:10.1109/TIE.2011.2176692.
26. Lukhtura, F., Medvedieva, M. On the application of pulsed supply of working environment in water supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 48–57, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.01.
27. Lukhtura, F. I., Karnaugh, N. V., Medvedieva, M. V., Ivashin, V. Yu. О повышении эффективности работы насосных станций [On increasing the efficiency of injection stations]. *Visnyk Pryazovs'koho derzhavnoho tekhnichnogo universytetu, Seriya: Tekhnichni nauky – [Reporter of the Pryazovsky State Technical University. Section: Technical sciences]*, 2018, **37**, 61-74, doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160239.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Іванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru

Fedor Lukhtura – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovsky State Technical University”, Mariupol, Ukraine; email: lukhelena@yandex.ru.

Медведєва Марина Владиславівна – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ассистент кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

Marina Medvedieva – Assistant, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovsky State Technical University”, Mariupol, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура, Ф. И. Об эффективности импульсной подачи рабочей среды для покрытия суточного графика нагрузок насосной станции / **Ф. И. Лухтура, М. В. Медведева** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 25-34. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.04.

Please cite this article as:

Lukhtura, F., Medvedieva, M. About the efficiency of pulse supplying of the working environment for coverage the daily schedule of a pumping station loads. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 25-34, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.04.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура, Ф. І. Про ефективність імпульсної подачі робочого середовища для покриття добового графіка навантажень насосної станції / **Ф. І. Лухтура, М. В. Медведєва** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 25-34. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.04.

АННОТАЦІЯ Розглянуто практичне використання отриманих раніше теоретичних результатів із застосуванням імпульсного (циклічного) підключення насосів, що працюють на мережу, для покриття суттєво змінних навантажень насосної станції. Проведено аналіз ефективності роботи насосних станцій із різними блоками насосних установок і параметрами систем водопостачання при змінних навантаженнях на основі аналізу розробленої математичної динамічної моделі системи виробництва й розподілу робочого середовища (води). Отримана інженерна теорія послужила також основою для розробки алгоритмів оптимізації системи ступеневого регулювання подачі нагнітачів шляхом їх переведення на холостий хід, в т.ч. глибоким дроселюванням, або з повним відключенням приводного двигуна, на змінних режимах роботи насосної станції при покритті нерівномірних графіків її навантажень з оцінкою витрат споживаної енергії, з метою підвищення економічної ефективності та вибору певного складу насосного обладнання в пропонованих режимах. Визначено, в залежності від стисності мережі та акумулюючих пристройів, величини споживання рідини і режимів регулювання, раціональні компоновки насосного обладнання з мінімізацією споживання електроенергії. Оцінені ефективні значення тривалості імпульсів подачі робочого середовища агрегатами насосної станції та пауз між імпульсами, а також сквантості імпульсів, при використанні різних блоків насосного обладнання. При цьому важливою характеристистикою надійності системи «електропривод-насос» є частота циклів, що лімітують кількість регламентованих включень електродвигунів відповідної потужності. Показано суттєвий вплив перерахованих факторів і зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підключення нагнітачів та інтенсивність подачі енергоносія при змінних навантаженнях. Характерно, що при порівнянні різних режимів імпульсної подачі (з холостим ходом і без) кращим режимом є режим з повним відключенням насосів від мережі. При цьому ефективність зростає з ростом числа експлуатованих агрегатів і сягає 15 % порівняно з традиційним способом подачі робочого середовища для покриття змінних навантажень станції. Отримані результати також можуть бути корисні для вирішення оптимізаційних завдань при роботі насосної станції на змінних режимах при покритті її річних графіків навантажень. Даний підхід і представлений рішення можуть бути поширені на інші класи нагнітальних станцій з компресорами або вентиляторами, що використовують як робоче середовище газ, для покриття нерівномірних навантажень нагнітальних станцій.

Ключові слова: графіки навантажень; насосна станція; насос; робоче середовище; енергія; акумулятор; імпульсна (циклічне, поетапне) регулювання; ефективність

Поступила (received) 01.10.2019

О ПРИМЕНЕНИИ ЦИКЛИЧНОГО РЕЖИМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Ф. И. ЛУХТУРА*, В. И. ЦЫГАНОВ

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА
*e-mail: lukhelena@yandex.ru

АННОТАЦИЯ Использование аккумуляторов в автономных системах теплоснабжения является широко известным приемом выравнивания тепловых нагрузок, экономии сырьевых и энергетических ресурсов. В качестве первичного источника энергии в таких системах успешно применяют теплоту пара, извлекаемую с периодично работающими утилизационных установок в основном охладителей конвертерных газов во время продувки конвертерной ванны для аккумуляции пара с помощью аккумуляторов Рутса. При существующих темпах и диапазонах изменения температуры в конце зарядки и разрядки при эксплуатации этих систем возможны усталостные явления в металлическом корпусе аккумулятора от существующих глубоких «прыжков» температур с образованием температурных напряжений (переохлаждение) его корпуса, что вызывает ряд технических проблем. Для предотвращения этого явления предлагается извлекать тепловую энергию из нескольких таких массо- и теплообменников при их поочередном подключении к испарительному контуру потребителя. Такой метод отбора теплоты позволяет не только избежать переохлаждения корпуса аккумулятора, но также повысить производительность процесса. На основе анализа формализованного уравнения динамики отпуска тепла потребителю при нагреве соответствующего теплоносителя сделан вывод об эффективности импульсного режима подключения аккумуляторов. При этом температура теплоносителя изменяется по экспоненциальному закону. При реализации предлагаемого метода нагрев очередной порции теплоносителя осуществляется в условиях наибольшей разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс. Доказано, что эффективность импульсного режима возможна при наличии уже двух или более аккумуляторов. Установлено, что продолжительность подключения каждого аккумулятора в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева теплоносителя при традиционном способе отбора теплоты.

Ключевые слова: источник тепла; аккумулятор; теплоноситель; система теплоснабжения; импульсный режим подключения

ON APPLICATION OF THE CYCLE MODE OF CONNECTING HEAT BATTERIES IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

F. LUKHTURA, V. TSIGANOV

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT The use of batteries in autonomous heating systems is a well-known method of equalizing heat loads, saving raw materials and energy resources. As a primary source of energy in such systems, they successfully use the heat of steam extracted from intermittently operating utilization plants, mainly converter gas coolers during the purging of the converter bath for steam accumulation using Roots batteries. At current rates and ranges of temperature change at the end of charging and discharging during operation of these systems, fatigue phenomena are possible in the metal case of the battery from the existing deep ‘jumps’ of temperatures with the formation of thermal stresses (overcooling) of its case, which causes a number of technical problems. To prevent this phenomenon, it is proposed to extract thermal energy from several such mass and heat exchangers when they are alternately connected to the evaporation circuit of the consumer. This method of selection of heat allows not only to avoid overcooling of the battery case, but also to improve the performance of the process. Based on the analysis of the formalized equation of the heat supply dynamics to the consumer when the corresponding coolant is heated, it is concluded that the efficiency of the pulsed mode of connecting batteries is effective. The temperature of the coolant varies exponentially. When implementing the proposed method, the heating of the next portion of the coolant is carried out under the conditions of the greatest temperature difference, which makes it possible to markedly intensify the process. It is proved that the efficiency of the pulse mode is possible if there are already two or more batteries. It has been established that the duration of connecting each battery in a pulsed mode should not reach the duration of the transient heating of the coolant with the traditional method of heat extraction.

Keywords: heat source; accumulator; heat source; heat carrier; heat supply system; pulse mode of connection

Введение

Повышение тепловой эффективности теплоснабжения потребителей в настоящее время в основном происходит за счет предыдущих «накатанных» достижений в области теплоэнергетики по энергосбережению. Снижение затрат энергии на

обеспечение теплом различных потребителей является весьма актуальной проблемой. Её решение может быть выполнено лишь с использованием новейших инновационных энергосберегающих подходов в системах теплоснабжения и на основе всестороннего анализа теплового процесса, реализуемого в системе получения, аккумулирования

и распределения тепла потребителям, под которым понимается последовательная цепь взаимообусловленных энергетических превращений, связанных с переносом теплоты от источника к потребителю. Возможности дальнейшего совершенствования работы теплоэнергетических установок (в первую очередь, источников тепла – котлов, тепловых аккумуляторов и др.), базирующихся на хорошо изученном стационарном процессе, ограничены. Поэтому возникает необходимость освоения новых энергосберегающих технологий. Весьма перспективным в этом направлении представляется возможная реализация в теплоэнергетических установках для аккумулирования тепла и его распределения процессов пульсирующего подвода (отвода) тепла. Как указано в работах [1,2], «не случайно во многих странах ведутся интенсивные исследования в области проектирования и внедрения в технологические процессы теплоэнергетических установок на основе систем пульсирующего подвода тепла». Широкое внедрение метода импульсного подвода (отвода) тепла в технологические процессы сдерживается отсутствием надежной теории рабочего процесса теплоэнергетических установок, работающих на этом принципе, для расчета конструктивных и режимных параметров при их проектировании.

Анализ работ по теоретическому обоснованию и технической реализации технологии импульсного подвода тепла (в системах горения, отопления, нагрева металлических слитков в промышленных печах и др.) приведены в публикация [1,2]. Показано также, что импульсный подвод тепла, наряду с другими вариантами его применения, может использоваться также и при теплоснабжении зданий [1–8] и в системах отопления с тепловыми насосными установками [6], где доказано аналитически, что импульсный подвод тепла от тепловых источников (котлов, насосов) для отопления зданий более рационален.

Целесообразность использования такого направления работы в системах теплоснабжения [1–8], в т.ч. системах аккумулирования и распределения тепла по потребителям, была обусловлена тем, что импульсный режим отопления промышленных печей, как это установлено в [1,2], характеризуется заметной экономией тепловой энергии. Поэтому вполне оправданным является применение такого режима для распределения тепла от тепловых аккумуляторов. И можно ожидать, что этот принцип будет также энергетически выгодным.

Повышение эффективности теплогенерирующих установок за счет утилизации избыточной теплоты с помощью аккумулирующих устройств и использования в системах теплоснабжения для покрытия «пиковой» тепловой нагрузки является актуальной проблемой, решение которой позволит создать новые технологии и соответствующие теплоэнергетические установки по

аккумулированию теплоты на других физических принципах.

По возможному применению импульсного подвода (отвода) тепла в системах аккумулирования и распределения тепла теоретическое обоснование его эффективности и анализ его динамики в технической литературе, кроме получения доказательства эффективности в системах теплоснабжения зданий [1–8], практически отсутствует.

Цель работы

Цель работы состоит в доказательстве преимущества применения импульсного подвода тепла к системе распределения от аккумулятора теплоты и его анализ на основе упрощенной физической модели рабочего процесса [1,2], а также обоснование эффективности теплоснабжения потребителей на таких режимах.

Изложение основного материала

При выборе источников теплоты для автономных и неавтономных систем тепло- и пароснабжения, в т.ч. для отопительных целей, проектировщики сталкиваются с явным несовпадением пиков выработки тепловой энергии с рациональным равномерным ее использованием на производственные нужды и нужды отопления. Для устранения этого дисбаланса и служит специальный элемент теплоэнергетического оборудования, называемый тепловым аккумулятором (тепловым накопителем, буферной емкостью), в периоды избыточного поступления теплоносителя (например, пар, вода) с отдачей его во время нехватки. Тепловой аккумулятор представляет собой достаточно объемный резервуар, корпус которого покрыт эффективной внешней (наружной) термоизоляцией, подключенный к контуру источника тепла (например, котла) и контурам распределения тепловым потребителям, в т.ч. для отопления.

Принцип действия водяного или пароводяного аккумулятора теплоты основан на использовании «эффекта теплоемкости» воды, имеющей высокое значение. Если большой объем последней в период пикового поступления тепловой энергии разогреть до соответствующего необходимого уровня, то в течение определенного периода можно использовать для производственных нужд и нужд отопления этот накопленный энергетический потенциал. Для сравнения порядка теплофизических показателей – всего 1 л воды при остывании на 1°C способен разогреть 1 м³ воздуха (при нормальных условиях) на 4°C.

Исследования, приведенные в работах [9–13] классифицируют тепловые аккумуляторы по различным параметрам и физическим принципам: по способу накопления тепловой энергии, по теплообменной и теплоаккумулирующей среде,

объему, массе, температуре и давлению в аккумуляторе и др.

Для кратковременного аккумулирования энергии в промышленных установках могут применяться пароводяные аккумуляторы (пар, горячая вода), работающие на энергии воды как нормального, так и повышенного давления. Основной задачей теплоаккумуляторов в промышленности является в первую очередь снижение потребления тепловой энергии извне, а не столько непосредственная экономия энергии, особенно при эксплуатации установок с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии [11–13].

Использование аккумуляторов в системах теплоснабжения является широко известным приемом выравнивания тепловых нагрузок, экономии сырьевых и энергетических ресурсов в металлургической промышленности [14]. В качестве первичного источника энергии в таких системах успешно применяют теплоту пара, извлекаемую с периодично работающих утилизационных установок, в основном охладителей конвертерных газов (ОКГ) во время продувки конвертерной ванны, для аккумуляции пара с помощью аккумуляторов Рутса (рис.1).

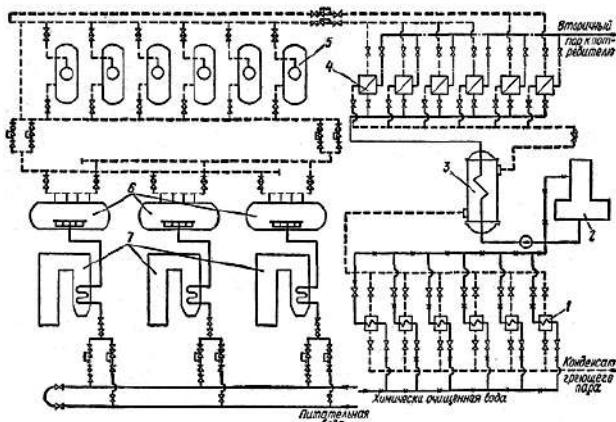


Рис.1 – Пример одной из схем расположения тепловых аккумуляторов в составе функциональной тепловой схемы энергокомплекса конверторного цеха с паропреобразователями [14]

1 – охладители конденсата; 2 – деаэратор; 3 – охладитель конденсата, I ступень;
4 – паропреобразователи (потребители); 5 – паровые аккумуляторы; 6 – барабан-сепаратор; 7 – ОКГ (котел-utiлизатор);
8 – регулятор давления «после себя»

Схема, представленная на рис. 1, может применяться при переменной нагрузке силового потребителя, а также при переменной производительности парового котла, что имеет место у некоторых котлов-utiлизаторов.

Большие габариты, значительная трудоемкость и сложность в изготовлении, тепловых аккумуляторов

такого типа препятствует их широкому распространению по промышленному предприятию, и применяются в основном в энергоблоке сталеплавильных конвертеров, у которых перерывы между продувками составляют обычно 15-30 минут, для покрытия кратковременных больших дефицитов пара. Количество пара, которое можно при этом получить из аккумулятора в процессе разрядки при заданном перепаде давления, называемая аккумулирующей способностью аккумулятора определяется по графику расхода пара [14] (Эта величина, отнесенная к 1 м³ водяного объема аккумулятора, называется удельной аккумулирующей способностью).

При всем при этом, объем аккумулятора зависит от характера графика тепловой нагрузки, необходимой степени выравнивания его и расчетных давлений пара в аккумуляторе в начале и конце зарядки. Чем больше разница между этими давлениями, тем больше удельная аккумулирующая способность аккумулятора и тем меньше размеры последнего при заданной производительности. Верхний предел давления зарядки определяется схемой включения аккумулятора в установку, а нижний в конце разрядки соответствует наименьшему допустимому давлению у потребителя пара.

При существующих темпах и диапазонах изменения температуры в конце зарядки и разрядки при эксплуатации этих систем возможны усталостные явления в металлическом корпусе аккумулятора от существующих глубоких «прыжков» температур с образованием температурных напряжений (переохлаждение) его корпуса, что вызывает ряд технических проблем. Для предотвращения этого явления предлагается извлекать тепловую энергию из нескольких таких массо- и теплообменников при их поочередном подключении к испарительному контуру потребителя. Такой метод отбора теплоты позволяет не только избежать переохлаждения корпуса аккумулятора, но также повысить производительность процесса.

Вместе с тем скорость притока тепловой энергии из парового котла или котла-utiлизатора и оттока к потребителю ограничена. Тепломассоотдача потребителю ограничена тепломассопроводящими свойствами аккумулятора и не позволяет использовать эти ресурсы сколь угодно быстро и в большом объеме. В результате таких попыток тепловой баланс может нарушаться, и возникают следующие проблемы:

- повышается риск и темпа образования температурных напряжений, поскольку система вынуждена функционировать в более экстремальном режиме;
- чрезмерное уменьшение температуры теплоносителя в аккумуляторе, а вместе с ней – температуры теплоносителя в установках потребителя – влечет за собой снижение эффективности системы; при значительном уменьшении температуры

теплоносителя работоспособность системы снижается.

Кроме того, снижение расхода теплоносителя определяет режим теплопередачи при относительно постоянной пониженной температуре, в то время как наибольшей эффективности теплопередачи от аккумулятора к теплоносителю внутри теплоутилизирующих установок потребителя можно было бы достичь при более высоких температурах.

Решение проблем может быть достигнуто за счет размещения в системе аккумулирования и распределения тепла нескольких (двух, трех и более) аккумуляторов, как, например, на энергоблоке кислородно-конвертерного цеха (ККЦ) (рис. 1, позиция 5). Отбор теплоты от этих тепломассообменников следует осуществлять не одновременно, а с определенной периодичностью. Управление отбором теплоты легко реализуется поочередным подключением аккумуляторов к сети теплоснабжения. При этом достигается более высокая температура теплоносителя у потребителя.

Для доказательства эффективности такого импульсного подвода (отвода) тепла рассмотрим для простоты анализа динамику (последовательность) работы системы пароснабжения (в т.ч. отопительной), содержащей два аккумулятора. В начальный момент к потребителю подключен один (первый) аккумулятор. По мере отбора тепловой энергии давление и температура насыщения первого тепломассообменника будет уменьшаться. При этом другой аккумулятор остается в режиме зарядки или в отключенном состоянии. Через некоторое время происходит отключение первого аккумулятора или перевод его на зарядку и подключение второго. Очень важно, чтобы за время подключения первого аккумулятора температура циркулирующего теплоносителя в нем не достигла установившегося значения. Далее происходит уменьшение температуры и давления во втором аккумуляторе, а в первом аккумуляторе они начинают за счет зарядки известным образом увеличиваться. После некоторого снижения температуры и давления во втором аккумуляторе он переключается на зарядку, а первый аккумулятор подключается. Далее цикл повторяется.

Для проведения анализа работы в таком режиме приведем уравнения динамики нагрева теплоносителя у потребителя тепла [4]. В общем случае это формализованное уравнение можно представить в виде:

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3, \quad (1)$$

где dQ_1 – подводимая теплота из аккумулятора, Дж; dQ_2 – теплота, затраченная на изменение температуры теплоносителя, Дж; dQ_3 – потери теплоты в окружающую среду, Дж.

Поскольку аккумулятор находится в слое изоляции, то собственно у него потерять в окружающую

среду нет. Поэтому под слагаемым dQ_3 мы понимаем потери теплоты в той части трубопровода с теплоносителем, которая находится за пределами аккумулятора до потребителя.

Слагаемые уравнения (1) можно представить так:

$$\begin{aligned} dQ_1 &= Pd\tau, & dQ_2 &= mdi, \\ dQ_3 &= kF(\vartheta - \vartheta_0)d\tau, \end{aligned}$$

где P – подводимая тепловая мощность от аккумулятора, Вт; $d\tau$ – интервал времени, с; m – масса нагреваемого теплоносителя, кг; i – энтальпия теплоносителя, Дж/кг; ϑ – текущая температура теплоносителя, К; k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К; F – поверхность теплопередачи (поверхность труб до потребителя), м²; ϑ_0 – температура окружающей среды, К.

Так как при существующих, на эксплуатируемых аккумуляторах соответствующего типа, диапазонах изменения параметров пара при дросселировании в регуляторах давления «после себя» можно принять, что энтальпия теплоносителя (пара) пропорциональна температуре $i = c \cdot \vartheta$, то тогда уравнение (1) можно представить в виде

$$Pd\tau = mcd\vartheta + kF(\vartheta - \vartheta_0)d\tau, \quad (2)$$

где c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К. После несложных преобразований уравнение (2) запишется так:

$$\frac{mc}{kF} \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau} - \left[\frac{P}{kF} - (\vartheta - \vartheta_0) \right] = 0, \quad (3)$$

или в виде:

$$\begin{aligned} T \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau} + \vartheta - \vartheta_{ycm} &= 0, \\ \vartheta_{ycm} &= \frac{P}{kF} + \vartheta_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $T = \frac{mc}{kF}$ – временной параметр, с; ϑ_{ycm} – установившееся значение температуры теплоносителя, достигаемое при прекращении его изменения, т.е. при выполнении условия $\frac{d\vartheta}{d\tau} = 0$, К.

Выражение (4) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, решением которого является

$$\vartheta = \vartheta_{na} e^{-\tau/T} + \vartheta_{ycm} (1 - e^{-\tau/T}) = \vartheta_{ycm} - (\vartheta_{ycm} - \vartheta_{na}) \cdot e^{-\tau/T} \quad (5)$$

где $\vartheta_{\text{нач}}$ – начальная температура теплоносителя (температура в начале процесса нагрева при $\tau = 0$).

Графическое изображение этого решения представлено на рисунке 2. Границные значения температуры могут быть записаны в виде условий: $\vartheta = \vartheta_{\text{нач}}$ при $\tau = 0$ и $\vartheta = \vartheta_{\text{уст}}$ при $\tau \rightarrow \infty$.

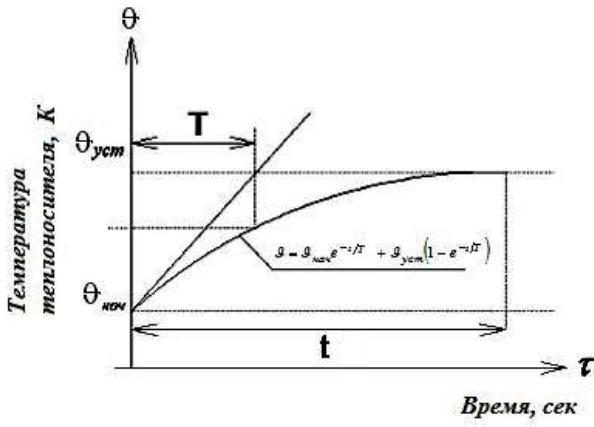


Рис.2 – Графическое представление зависимости температуры теплоносителя от времени нагрева аккумулятором теплоты

Обсуждение результатов

Для дальнейшего доказательства преимущества использования импульсного подключения аккумуляторов нас будет интересовать слагаемое dQ_2 в выражении (1). Как было указано выше, $dQ_2 = mcd\vartheta$. Далее воспользуемся выражением (5) для расчета значений текущей температуры в функции времени. Для получения сомножителя $d\vartheta$ проинтегрируем это выражение (5) по $d\tau$:

$$\begin{aligned} d\vartheta &= d[\vartheta_{\text{нач}}e^{-\tau/T} + \vartheta_{\text{уст}}(1 - e^{-\tau/T})] = \\ &= \left[-\frac{1}{T} \cdot \vartheta_{\text{нач}}e^{-\tau/T} - \left(-\frac{1}{T} \right) \vartheta_{\text{уст}}e^{-\tau/T} \right] d\tau = \\ &= \frac{1}{T} e^{-\tau/T} (\vartheta_{\text{уст}} - \vartheta_{\text{нач}}) d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом,

$$dQ_2 = mc \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\tau/T} (\vartheta_{\text{уст}} - \vartheta_{\text{нач}}) d\tau. \quad (7)$$

Для определения количества теплоты Q_2 проинтегрируем выражение (7):

$$\begin{aligned} Q_2 &= \int mcd\vartheta = mc \cdot \frac{1}{T} \cdot (\vartheta_{\text{уст}} - \vartheta_{\text{нач}}) \int e^{-\tau/T} d\tau = \\ &= \frac{mc}{T} (\vartheta_{\text{уст}} - \vartheta_{\text{нач}}) \cdot (-T) \cdot e^{-\tau/T} = \\ &= mc(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \cdot e^{-\tau/T}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее сравним количества тепловой энергии, переданной теплоносителю от теплового аккумулятора при непрерывной подаче пара и нагреву его от начальной $\vartheta_{\text{нач}}$ до установившейся $\vartheta_{\text{уст}}$ температуры за время от 0 до t , с количеством теплоты, переданной по рекомендуемому способу импульсного нагрева от начальной температуры $\vartheta_{\text{нач}}$ до температуры, которую примет теплоноситель в результате нагрева за время от 0 до $\frac{1}{2}t$. Обозначим первое и второе количество теплоты соответственно символом $Q_2^{(1)}$ и символом $Q_2^{(2)}$.

В результате расчета, по аналогии с выводами [6], будем иметь:

$$Q_2^{(1)} = \int_0^t dQ_2 = mc(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \left(e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right), \quad (9)$$

$$Q_2^{(2)} = 2 \int_0^{t/2} dQ_2 = 2mc(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \left(e^{-\frac{t}{2T}} - 1 \right). \quad (10)$$

Для сравнения значений $Q_2^{(1)}$ и $Q_2^{(2)}$, полученных по выражениям (9) и (10), соответственно найдем их разность:

$$\begin{aligned} Q_2^{(2)} - Q_2^{(1)} &= mc \left[2(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \left(e^{-\frac{t}{2T}} - 1 \right) - (\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \left(e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right) \right] = \\ &= mc(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \cdot \left(2e^{-\frac{t}{2T}} - 2 - e^{-\frac{t}{T}} + 1 \right) = \\ &= mc(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}}) \cdot \left(2e^{-\frac{t}{2T}} - e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Сомножители $mc > 0$ и $\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{уст}} < 0$. Для справедливости неравенства $Q_2^{(2)} > Q_2^{(1)}$ необходимо, чтобы разность $Q_2^{(2)} - Q_2^{(1)} > 0$. Последнее неравенство будет соблюдаться при условии, что $\left(2e^{-\frac{t}{2T}} - e^{-\frac{t}{T}} - 1 \right) < 0$.

Для дальнейшего анализа обозначим, используя подход [6], $e^{-\frac{t}{2T}} = x$, тогда $e^{-\frac{t}{T}} = x^2$ и запишем последнее неравенство с учетом принятых обозначений: $x^2 - 2x + 1 > 0$.

Поскольку $x = \pm 1$ является корнем сформированного квадратного многочлена, то можно записать, в соответствии с вышесказанным:

$$(x - 1)^2 > 0. \quad (12)$$

Решением неравенства (12) служит множество $x \in (-1; 1) \cup (\infty)$. Исключая значение $x \neq 1$ и принимая

во внимание, что $x = e^{-\frac{t}{2T}}$ получим, согласно [6], что $t \neq 0$. Так как $e^{-\frac{t}{2T}} > -1$, то при любом действительном значении t (кроме $t = 0$) и с учетом того, что t (время) всегда положительно, можно сделать вывод [6] о выполнении неравенства $Q_2^{(2)} > Q_2^{(1)}$.

Таким образом, доказано, что подвод тепла от тепловых аккумуляторов в импульсном режиме с энергетической точки зрения более рационально. Суммарный объем тепловой энергии, снятой с аккумулятора уже при двух (но и более) поочередных импульсных подключениях, оказывается большим, чем при использовании одного аккумулятора в течение того же времени, что совпадает с теоретическими результатами [6]. Импульсный режим предполагает нагрев двух независимых порций теплоносителя от начальной температуры $\vartheta_{\text{нач}}$ до значения в конечный момент подключаемого очередного аккумулятора теплоты. Кроме того, увеличение мощности теплоподвода, т.е. роста $\vartheta_{\text{уст}}$ приводит еще к более эффективному режиму импульсного подвода тепла. На рис. 3 проиллюстрирован графически нагрев теплоносителя в импульсном режиме.

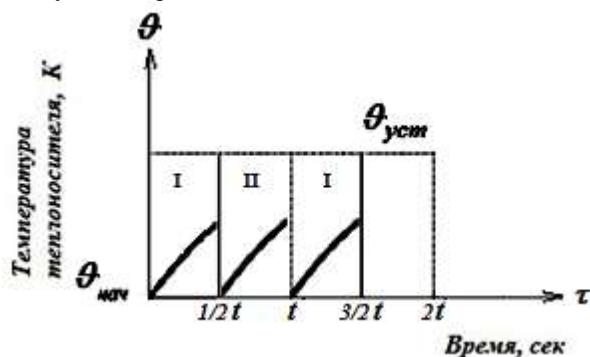


Рис. 3 – Динамика нагрева теплоносителя при подведении тепловой энергии от аккумуляторов теплоты в импульсном режиме

I – изменение температуры теплоносителя при включении первого аккумулятора; II – изменение температуры теплоносителя при включении второго аккумулятора

Кроме того вызывает интерес тот факт, что ввиду ограничения продолжительности нагрева, теплоноситель в аккумуляторе не успевает охладиться до более низкой температуры. Последнее обстоятельство способствует сохранению более длительной работоспособности аккумуляторов и снижает риск появления микротрещин в его корпусе.

Выводы

Используя представленную аналитическую модель системы импульсного отвода тепла от

теплового аккумулятора определены основные параметры режима нагрева теплоносителя.

Доказано, что эффективность импульсного режима возможна при наличии двух или более аккумуляторов теплоты (теплоподводящих систем). Установлено, что продолжительность их подключения в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева теплоносителя у потребителя при традиционном способе подвода теплоты. При работе системы паро- и теплоснабжения по описанному принципу снимается большее количество тепловой энергии с тех же аккумуляторов за то же время, чем при традиционном способе. Температура теплоносителя также выше, что интенсифицирует процесс теплопередачи.

Для оптимизации технологии рационального нагрева теплоносителя с импульсным подводом тепла тепловым аккумулятором необходимо продолжить исследования по влиянию характеристик этого режима (скважность, частота процесса) на распределение термогазодинамических параметров системы (температуры, давления, энтальпии и др.) с течением времени и по объему рабочего пространства при различных ее размерах с уточнением математической модели.

При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет гидрогазодинамики и тепло- и массообмена во внутреннем объеме теплового аккумулятора при различных интенсивностях импульсной теплоотдачи, и влияния скорости циркуляции теплоносителя в системе аккумулирования, что позволит получить более полную картину и разработать более эффективные методы импульсного подвода и отвода тепла в системах аккумулирования и распределения тепла.

Список литературы

- Лухтура, Ф. И. Об импульсном нагреве теплоносителя в системах теплоснабжения / Ф. И. Лухтура, К. Е. Плахотник, В. И. Цыганов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. 36. – С. 101-112. – doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142530.
- Лухтура, Ф. И. О применении импульсного подвода тепла в системах теплоснабжения / Ф. И. Лухтура, В. И. Цыганов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 32-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05.
- Лухтура, Ф. И. Об импульсном нагреве теплоносителя в системах отопления / Ф. И. Лухтура // Университетская наука – 2017 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (18-19 мая 2017 г.; Маріуполь). – Маріуполь, ГВУЗ «ПГТУ», 2017. – Т. 1. – С. 231-232.
- Лухтура, Ф. И. Совершенствование теплообменных процессов в поверхностях нагрева энергетических

- котлов / **Ф. И. Лухтура** // Университетская наука – 2018 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (23-24 мая 2018 г.; Мариуполь). – Мариуполь, 2018. – Т.1. – С. 231-235.
5. **Лухтура, Ф. И.** Усовершенствование систем теплоснабжения и кондиционирования на основе исследования импульсного подвода (отвода) тепла / **Ф. И. Лухтура, К. Е. Плахотник** // Университетская наука – 2018 : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (23-24 мая 2018 г.; Мариуполь). – Мариуполь, 2018. – Т. 1. – С. 248-249.
6. **Андреев, С. А.** Импульсный режим подключения грунтовых теплообменников в теплоносительных отопительных системах / **С. А. Андреев** [и др.] // Вестник Федерального Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агронженерный университет им. В.П. Горячина». – 2015. – № 6 (70). – С. 39-44.
7. **Дегтярь, А. Б.** Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы / **А. Б. Дегтярь, В. И. Панферов** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2008. – Вып. 8. – № 17 (117). – С. 41-44.
8. **Нагорная, А. Н.** Моделирование и управление тепловым режимом здания / **А. Н. Нагорная, В. И. Панферов, Е. Ю. Пашина** // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: материалы междунар. науч.-техн. конф. – М: МГСУ, 2005. – С. 94-98.
9. **Бекман, Г.** Тепловое аккумулирование энергии / **Г. Бекман, П. В. Гилли.** – М.: Мир, 1987. – 269 с.
10. **Левенберг, В. Д.** Аккумулирование тепла / **В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем.** – К.: Техника, 1991. – 111 с.
11. **Куколев, М. И.** Основы проектирования тепловых накопителей энергии / **М. И. Куколев.** – Петрозаводск, 2001. – 238 с.
12. **Сотникова, О. А.** Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения / **О. А. Сотникова, В. С. Турбин, В. А. Григорьев** // АВОК. – 2003. – № 5. – С. 40-45.
13. **Андрющенко, А. И.** Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок: уч. Пособие / **А. И. Андрющенко.** – М.: Высш. школа, 1985. – 320 с.
14. **Семененко, Н. А.** Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности / **Н. А. Семененко** [и др.]. – Киев: Вища школа, 1979. – 296 с.
- 2018, **45** (1321), 32–40, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.05.
3. **Lukhtura, F. I.** Ob impul'snom nagreve teplonositelya v sistemakh otopleniya [About pulse heating of a heat carrier in heating systems]. Tez. dokl. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2017» [Abstracts of Int. sci-techn. conf. «University Science-2017»]. Mariupol', 2017, **1**, 231-232.
4. **Lukhtura, F. I.** Sovrshennstvovaniye teploobmennyykh protsessov v poverkhnostyakh nagreva energeticheskikh kotlov [Improving heat transfer processes in the heating surfaces of power boilers]. Tez. dokl. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2018» [Abstracts of Int. sci-techn. conf. «University Science-2018»]. Mariupol', 2018, **1**, 231-235.
5. **Lukhtura, F. I., Plakhotnik, K. Ye.** Usovershenstvovaniye sistem teplosnabzheniya i konditsionirovaniya na osnove issledovaniya impul'snogo podvoda (otvoda) tepla [Improving heat supply and air conditioning systems based on the study of pulsed heat supply (removal)]. Tez. dokl. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Universitetskaya nauka-2018» [Abstracts of Int. sci-techn. conf. «University Science-2018»]. Mariupol', 2018, **1**, 248-249.
6. **Andreyev, S. A., Zaginaylov, V. I., Ivanova, T. V., Flegontov, Ye. A.** Impul'snyy rezhim podklyucheniya gruntovykh teploobmennikov v teplonasosnykh otopitel'nykh sistemakh [Pulsed mode of connection of ground heat exchangers in heat pump heating systems]. Vestnik Federal'nogo Gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina» [Bulletin of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin”], 2015, **6** (70), 39-44.
7. **Degtyar', A. B., Panferov, V. I.** Postroyeniye algoritma impul'snogo otopleniya zdaniy i issledovaniye rezhimov yego raboty [Construction of an algorithm for pulsed heating of buildings and study of its operating modes]. Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika» [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics], 2008, **8**, 17(117), 41-44.
8. **Nagornaya, A. N., Panferov, V. I., Pashnina, Ye. Yu.** Modelirovanie i upravlenie teplovym rezhimom zdaniia [Modeling and control of the thermal regime of the building.] Materialy Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii» [Proceedings of the Int. Sci.-Tech. Conf. "Theoretical Foundations of Heat and Gas Supply and Ventilation"]. Moscow, 2005, 94-98.
9. **Bekman, G., Gilli, P. V.** Teplovoye akkumulirovaniye energii [Thermal energy storage]. Moscow: Mir Publ., 1987. 269.
10. **Levenberg, V. D., Tkach, M. R., Gol'strem, V. A.** Akkumulirovaniye tepla [Heat storage]. Kiev: Tekhnika Publ., 1991, 111.
11. **Kukolev, M. I.** Osnovy proyektirovaniya teplovyykh nakopiteley energii [Fundamentals of designing thermal energy storage]. Petrozavodsk, 2001, 238.
12. **Sotnikova, O. A., Turbin, V. S., Grigor'yev, V. A.** Akkumulyatory teploty teplogeneriruyushchikh ustyanovok sistem teplosnabzheniya [Accumulators of heat of heat-generating installations of heat supply systems]. AVOK –

References (transliterated)

1. **Lukhtura, F. I., Plakhotnik, K. Ye., Tsiganov, V. I.** Ob impul'snom nagreve teplonositelya v sistemakh teplosnabzheniya [On pulse heating of a heat carrier in heat supply systems]. Vіsnik Priazovskyi derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki [Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences], 2018, **36**, 101-112, doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142530.
2. **Lukhtura, F., Tsiganov, V.** On the use of pulse heat in a heat supply system. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI",

- [*ABOK*], 2003, 5, 40-45. Available at : https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2121
13. **Andryushchenko, A. I.** Osnovy termodinamiki tsiklov teploenergeticheskikh ustavovok: uch. posobiye [Fundamentals of thermodynamics of cycles of heat power plants: tutorial]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 320.
14. **Semenenko, N. A., Kuperman, L. I., Romanovskiy, S. A., Itskovich, N. M., Sidel'kovskiy, L. N., Vukovich, L. K.** Vtorichnyye energoresursy i energotekhnologicheskoye kombinirovaniye v promyshlennosti [Secondary energy resources and energy-technological combination in industry]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1979, 296.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Іванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru.

Fedor Lukhtura – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine; email: lukhelena@yandex.ru.

Цыганов Владимир Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

Vladimir Tsiganov – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovskyi State Technical University”, Mariupol, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура, Ф. И. О применении цикличного режима подключения аккумуляторов теплоты в системах теплоснабжения / Ф. И. Лухтура, В. И. Цыганов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 35-42. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.

Please cite this article as:

Lukhtura, F., Tsiganov, V. On application of the cycle mode of connecting heat batteries in heat supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 35-42, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура, Ф. И. Про застосування цикличного режиму підключення акумуляторів теплоти в системах теплопостачання / Ф. И. Лухтура, В. И. Цыганов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 35-42. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.

АННОТАЦІЯ Використання акумуляторів у автономних системах теплопостачання є широко відомим прийомом вирінювання теплових навантажень, економії сировинних і енергетичних ресурсів. В якості первинного джерела енергії в таких системах успішно застосовують теплоту пара, отриманого з періодично працюючими утилізаційними установками, в основному охолоджувачів конвертерних газів під час продувки конвертерної ванни для акумуляції пара за допомогою акумуляторів Рутса. При наявних темперах і діапазонах зміни температури наприкінці зарядки і розрядки при експлуатації цих систем можливі явища утоми у металевому корпусі акумулятора від існуючих глибоких «стрибків» температури з утворенням температурних напружень (переохолодження) його корпусу, що викликає ряд технічних проблем. Для запобігання цьому явищу пропонується діставати теплову енергію з декількох таких масо-і теплообмінників при їх почерговому підключенні до випарного контуру споживача. Такий метод відбору теплоти дозволяє не тільки уникнути переохолодження корпусу акумулятора, але також підвищити продуктивність процесу. На основі аналізу формалізованого рівняння динаміки відпустки тепла споживачеві при нагріванні відповідного теплоносія зроблено висновок про ефективність імпульсного режиму підключення акумуляторів. При цьому температура теплоносія змінюється за експоненціальним законом. При реалізації запропонованого методу, нагрівання чергової порції теплоносія здійснюється в умовах найбільшої різниці температур, що дозволяє помітно інтенсифікувати процес. Доведено, що ефективність імпульсного режиму можлива при наявності вже двох або більше акумуляторів. Встановлено, що тривалість підключення кожного акумулятора в імпульсному режимі не повинна досягати тривалості переходного процесу нагріву теплоносія при традиційному способі відбору теплоти.

Ключові слова: джерело тепла; акумулятор; теплоносій; система теплопостачання; імпульсний режим підключення

Поступила (received) 01.10.2019

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР КВЧ ДИАПАЗОНА С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ЧАСТОТЫ

I. П. ОЛЬХОВСКИЙ^{1*}, А. И. ФИСУН², А. М. ФУРСОВ³

¹ кафедра компьютерных систем и сетей, Харьковский колледж Государственного университета телекоммуникаций, г. Харьков, УКРАИНА

² отдел твердотельной электроники, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины (ИРЭ НАНУ), г. Харьков, УКРАИНА

³ Харьковский патентно-компьютерный колледж, г. Харьков, УКРАИНА

*e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net

АННОТАЦІЯ Изложен способ долговременной стабилизации частоты твердотельного генератора КВЧ диапазона путем поддержания постоянной температуры резонансной системы. В качестве такой системы используется открытый резонатор, резонансная частота которого в основном определяется его длиной. Температура резонатора контролировалась полупроводниковым датчиком, а стабилизация температуры осуществлялась с помощью элементов Пельтье, включенных между тепловыделяющим элементом (диодом Ганна) и радиатором. Для согласования высокодобротного открытого резонатора с низкоимпедансным источником электрических колебаний применено многозвездное согласование активного элемента и открытого резонатора, которое разрежало спектр выходного сигнала как по поперечным, так и по продольным типам колебаний. Частота генерации с диодом Ганна составила 36 ГГц, модуляционная характеристика генератора $S = \Delta f_e / \Delta U_d = 6$ МГц/В, выходная мощность не менее 50 мВт, точность контроля температуры $t = \pm 1^\circ\text{C}$ в интервале изменения внешней температуры $-20 - +30^\circ\text{C}$, рабочая температура 35°C . В результате генератор с открытым резонатором имел уход частоты менее 0,5 МГц в течение 7 часов. Для сравнения уход частоты аналогичного генератора с волноводным резонатором за то же время составил около 20 МГц. К тому же генератор с открытым резонатором и термостабилизацией быстрее выходил на режим стабилизации частоты. Стабильность частоты, оцениваемая по меткам анализатора спектра, не хуже чем $1 \cdot 10^{-7} \text{ мин}^{-1}$. Долговременная температурная стабильность $(\Delta f/f)/\Delta T = \pm 1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Следует отметить, что резонатор возбуждается на квазиосновном типе колебаний, что позволяет осуществить дополнительную перестройку частоты за счет изменения длины L резонатора $\sim 0,25$ ГГц при снижении мощности генерации на 3 дБ. Подобным методом можно также создать твердотельные источники с долговременной стабильностью в области частот 150-300 ГГц.

Ключевые слова: частота; долговременная стабилизация частоты; твердотельный генератор; температура; КВЧ диапазон; открытый резонатор

SOLID-STATE GENERATOR OF EHF RANGE WITH INCREASED LONG-TERM FREQUENCY STABILITY

I. OLKHOVSKIY¹, A. FISUN², A. FURSOV³

¹ department of computer systems and networks, Kharkiv College of State University of Telecommunications, Kharkiv, UKRAINE

² department of Solid-State Electronics, O. Ya. Usikov Institute for Radio Physics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

³ Kharkiv patent-computer college, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A method for long-term frequency stabilization of a solid-state generator of the EHF range by maintaining a constant temperature of the resonant system is described. An open resonator with resonant frequency mainly determined by its length is used. The resonator temperature was controlled by a semiconductor sensor and the temperature stabilization was carried out using Peltier elements connected between the fuel element (Gunn diode) and the radiator. The multi-link matching of the active element and the open resonator, which rarefy the spectrum of the output signal in both transverse and longitudinal types of oscillations, was used to match a high- Q open resonator with a low-impedance source of electrical oscillations. The generation frequency with the Gunn diode was 36 GHz, the modulation characteristic of the generator $S = \Delta f_e / \Delta U_d = 6$ MHz/V, output power was not less than 50 mW, accuracy of temperature control $t = \pm 1^\circ\text{C}$ in the range of external temperature changes $-20 - +30^\circ\text{C}$, operating temperature was 35°C . As a result, the open resonator generator had a frequency drift of less than 0.5 MHz for 7 hours. For comparison, the frequency drift of a similar generator with a waveguide resonator for the same time was about 20 MHz. In addition, the generator with an open resonator and thermal stabilization entered the frequency stabilization mode earlier. Frequency stability, estimated by the labels of the spectrum analyzer, is not worse than $1 \cdot 10^{-7} \text{ min}^{-1}$. Long-term temperature stability $(\Delta f/f)/\Delta T = \pm 1 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

It should be noted that the resonator is excited on a quasi-basic type of oscillation, which allows additional frequency tuning by changing the length L of the resonator ~ 0.25 GHz with a decrease in the output power by 3 dB. A similar method could be used to create a solid-state sources with long-term stability in the 150-300 GHz frequency range.

Keywords: frequency; long-term frequency stabilization; solid-state generator; temperature; EHF range; open resonator

Введение

Для создания систем связи КВЧ диапазона требуются источники излучения с низкими частотными шумами и долговременной стабильностью частоты [1-5]. Высокая стабильность генераторов миллиметрового диапазона может быть достигнута различными способами. Один из них заключается в многократным умножением частоты кварцевого генератора и синхронизации полученным сигналом КВЧ генератора, другой использует систему подстройки частоты КВЧ генератора по опорному сигналу, полученному многократным умножением частоты генератора, стабилизированному кварцевым резонатором. Оба способа требуют значительных аппаратных затрат, сложны в настройке и имеют неудовлетворительный спектр. Третий путь заключается в непосредственном использовании высокодобротной колебательной системы со стабильными размерами.

Цель работы

Создание высокостабильного источника электрических колебаний миллиметрового диапазона с высокими спектральными свойствами.

Стабилизация частоты

В источниках миллиметрового диапазона к колебательной системе необходимо предъявлять ряд повышенных требований, а именно высокая собственная добротность, разреженный спектр колебаний, стабильность геометрических размеров. В длинноволновой части миллиметрового диапазона успешно используются объемные цилиндрические резонаторы, включенные по реактивно отражающей схеме.

В средней и коротковолновой части миллиметрового диапазона более предпочтительным является использование открытых сфера-уголково-эшеллонных резонаторов, позволяющих получить необходимое разрежение спектра, как по поперечным, так и по продольным типам колебаний [6,7].

Одним из долговременных дестабилизирующих факторов является температурный уход частоты колебаний. Тепло, выделяемое активным элементом, а также колебания температуры внешней среды, приводят к изменению линейных размеров колебательной системы. Поэтому, стабилизация геометрических

параметров колебательной системы позволит, при сохранении высокого уровня подавления шумов вблизи несущей, добиться высокой долговременной стабильности.

Температурная стабилизация размеров, а следовательно и частоты, сводится в общем случае к трем основным приемам: применению материалов с низким коэффициентом температурного расширения, температурной линейной компенсации и терmostатированию колебательного контура.

На рис. 1 показана конструкция предложенного генератора. Для уменьшения температурной зависимости геометрических размеров зеркала и корпус изготовлены из суперинвара. Механическая жесткость ОР обеспечивается тем, что уголково-эшеллонное зеркало 1 выполнено из суперинвара заодно с цилиндрическим корпусом ОР. Сферическое зеркало 2 установлено на компенсаторе 3 из меди. Механизм перемещения зеркала 4 обеспечивает подстройку длины ОР. Терморегулирование осуществляется с помощью алюминиевого теплоотвода - радиатора 5 и элементов Пельтье 6, установленных между источником колебаний 7 и внешним радиатором 5. Электромагнитная энергия выводится через стандартный прямоугольный волновод 8. Генератор и ОР помещены в герметичную капсулу 9, заполненную пенопластом 10. Окно 11 служит для доступа к механизму подстройки 4. Вывод энергии герметизируется радиопрозрачным окном 12. В теле уголково-эшеллонного зеркала установлены датчики температуры 13. Функциональная схема стабилизации температуры и тепловых потоков показана на рис. 2.

Она состоит из следующих основных элементов: регулирующие элементы Пельтье 1, датчик температуры 2, компаратор 3, управляемый источник питания регулирующих элементов 4. Тепловой поток W_1 , выделяемый диодом Ганна или ЛПД 5, распределяется частично по резонатору W_2 , и в конечном итоге через теплоизолятор эта доля потока попадает на внешний радиатор (показано пунктиром).

Основная доля потока W_1 через элементы Пельтье 1 передается на радиатор 6, кроме того, для улучшения эффективности схемы часть теплового потока W_3 передается на радиатор по дополнительному нерегулируемому тепловоду 7. Схема терморегулирования питается от внешнего независимого источника питания 8.

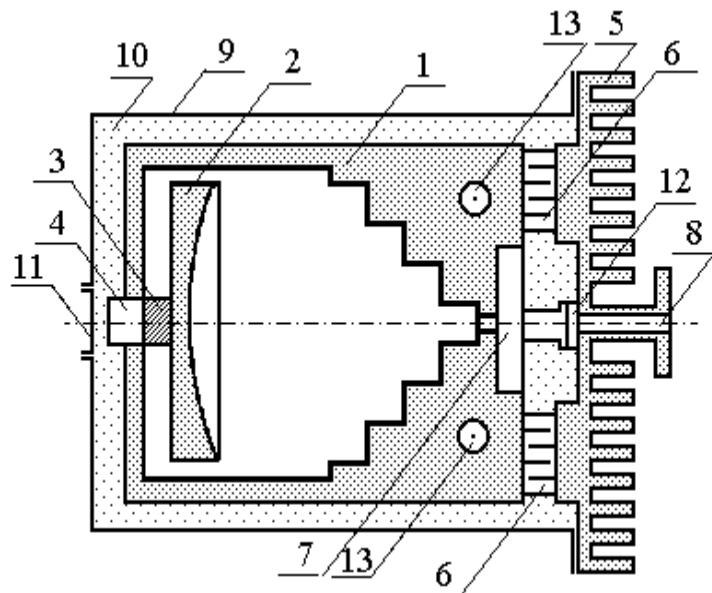


Рис. 1 – Конструкция квазиоптического генератора с долговременной стабилизацией частоты

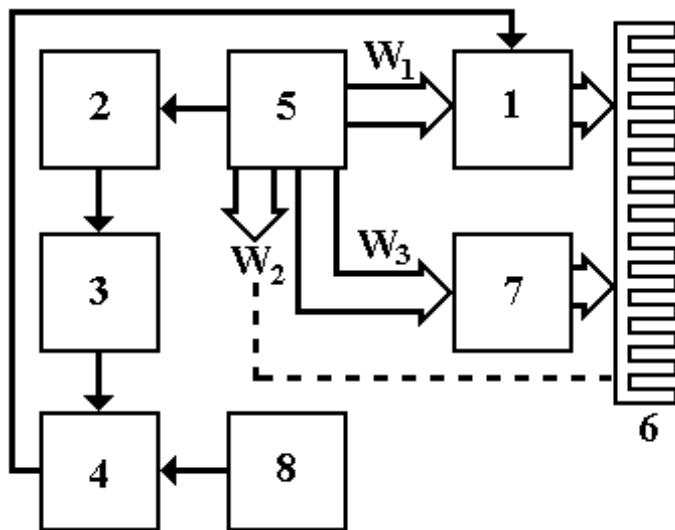


Рис. 2 – Функциональная схема стабилизации температуры и движения тепловых потоков

В предложенном источнике излучения применено многозвездное согласование активного элемента и ОР, включенных по реактивно-отражающей схеме [8-12]. Частота генерации $f = 36,4$ ГГц, модуляционная характеристика генератора $S = \Delta f / \Delta U_d = 6$ МГц/В. Мощность, отдаваемая в нагрузку, не менее 50 МВт, точность контроля температуры $t = \pm 1^{\circ}\text{C}$ в интервале изменения внешней температуры $-20...+30^{\circ}\text{C}$. Рабочая температура резонатора 35°C .

На рис. 3 показано изменение частоты генерации источника с долговременной стабильностью. Они сняты при технических параметрах анализатора спектра С4-60: полоса обзора - 100 кГц, разрешение в полосе обзора - 10 кГц между метками, полоса пропускания фильтра по ПЧ – 1,0 кГц, постоянная времени детектора 0,03 с.

Для сравнения на рис. 4 показаны аналогичные характеристики для волноводного генератора без стабилизирующего резонатора.

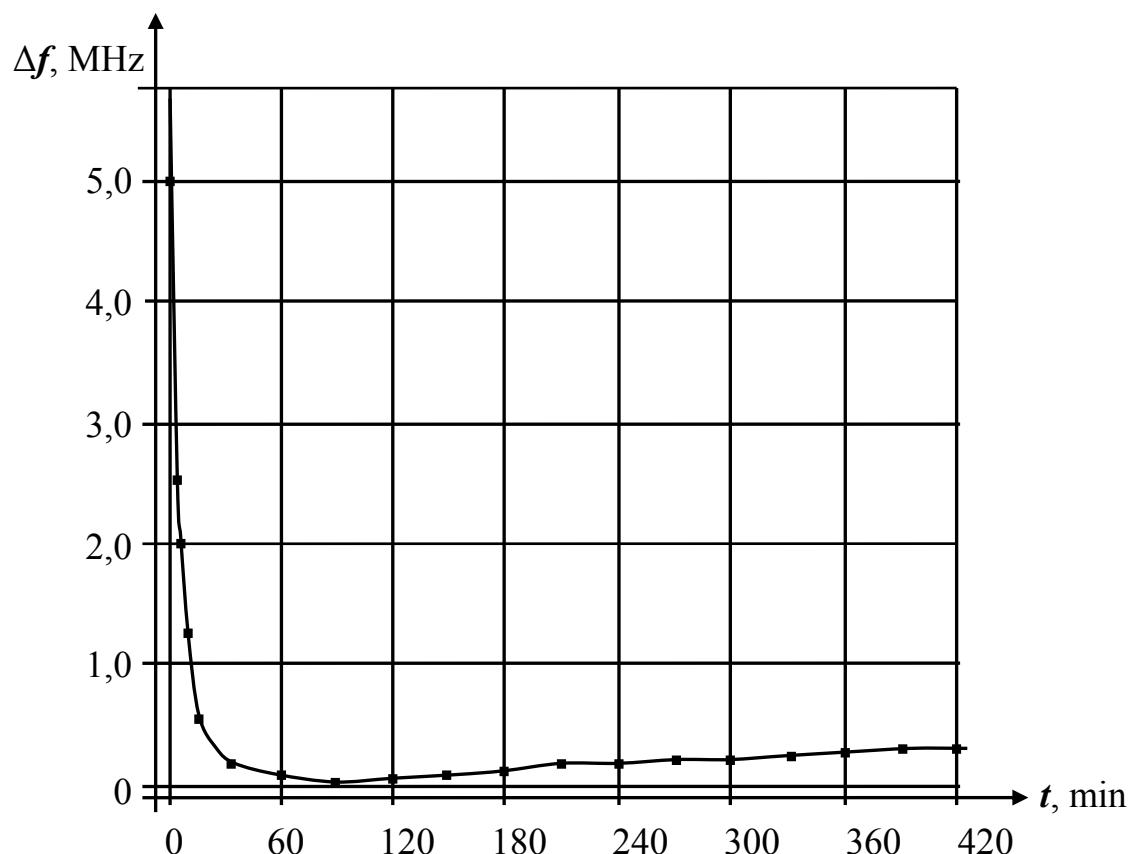


Рис. 3 – Изменение частоты генерации от времени работы для квазиоптического генератора с диодом Ганна

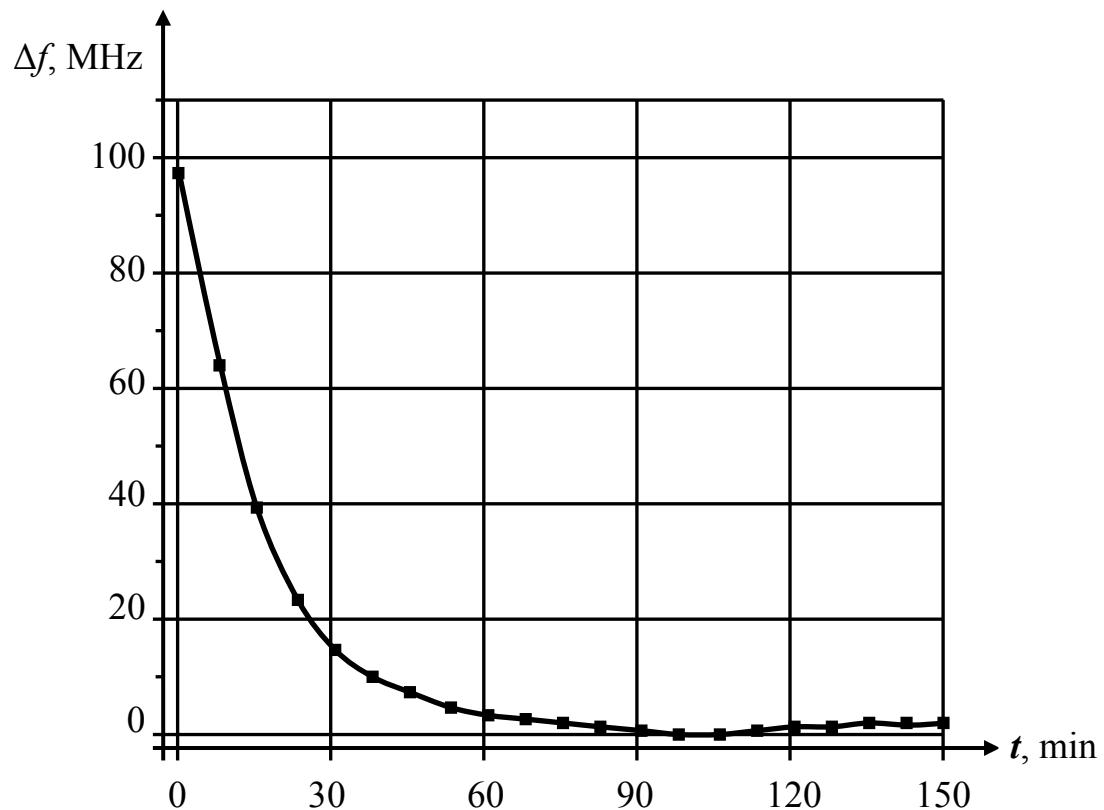


Рис. 4 – Изменение частоты генерации от времени работы для волноводного генератора с диодом Ганна

Стабильность частоты, оцениваемая по анализатору спектра, не хуже чем $1 \cdot 10^{-7} \text{ мин}^{-1}$. Долговременная температурная стабильность $(\Delta f/f)/\Delta T = \pm 1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что резонатор возбуждается на квазиосновном типе колебаний и дополнительная перестройка частоты за счет изменения длины L резонатора составляет $\sim 0,25$ ГГц при снижении мощности генерации на 3 дБ. Методом масштабного моделирования можно создать однодиодные твердотельные источники с долговременной стабильностью в области частот 150–300 ГГц.

Выводы

Разработанный и описанный твердотельный генератор восьмимиллиметрового диапазона длин волн, обладающий столь высокими техническими характеристиками, может найти широкое применение при исследованиях в КВЧ диапазоне, в различных телекоммуникационных системах в качестве задающего генератора или гетеродина радиорелейных линий связи.

Список литературы

1. Кунденко, Н. П. Анализ методов построения источников КВЧ излучения с высокой стабильностью их частоты / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 2/8 (56). – С. 18-22.
2. Miroshnichenko, V. S. Competition and Cooperation of Modes in Small-Volume DRO with Periodic Structure of Coupled Grooved Waveguide / V. S. Miroshnichenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Vol. 68, N 3. – P. 231–245. – doi: 10.1615/TelecomRadEng.v68.i3.30.
3. Skresanov, V. N. Active Quasi-Optical Refractometer in the extremely High Frequencies (EHF) Band / V. N. Skresanov, V. V. Glamazdin, A. I. Fisun, A. I. Shubnyi // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, N 1. – P. 83–96. – doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.70.
4. Onisto, H. J. Frequency doubled and stabilized all-solid-state Ti:sapphire lasers / H. J. Onisto, R. L. Cavasso-Filho, A. Scalabrin, D. Pereira, and F. C. Cruz // Opt. Eng. – 2002. – 41. – P. 1122–1127. – doi: 10.1117/1.1466850.
5. Bilous, O. I. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 2: high-stable oscillators and application / O. I. Bilous, A. I. Fisun, A. A. Kirilenko, M. P. Natarov, A. I. Shubnyi, S. P. Sirenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – 78 (4). – P. 341–361. – doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i4.50.
6. Фисун, А. И. Долговременная стабилизация частоты квазиоптических твердотельных генераторов КВЧ-диапазона / А. И. Фисун // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1998. – Т.3, № 5. – С. 56-59.
7. Belous, O. I. Power and Spectrum Performance of Quasi-Optical solid-state MM-Wave Oscillator / O. I. Belous, O. N. Sukhoruchko, A. I. Fisun // Telecommunication and Radio Engineering. – 2006. – Vol. 65, № 16. – P. 1501–1513. – doi: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i16.50.
8. Ольховский, И. П. Входной малошумящий твердотельный модуль миллиметрового диапазона волн / И. П. Ольховский, И. П. Сухоручко, Л. А. Рудь, А. И. Фисун // Радиотехника. – 2003. – Вып. 132. – С. 87–93.
9. Архипов, А. В. Стабилизация частоты твердотельных источников мм диапазона. Резонансные системы / А. В. Архипов, А. И. Фисун, Б. М. Булгаков, М. С. Болтовец // Материалы 14-ой международной крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2004. – С. 119-120.
10. Фисун, А. И. Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы приложений / А. И. Фисун, О. И. Белоус // Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №4. – С. 41–64.
11. Khanna, A. P. S. (Paul). Microwave Oscillators: The State of the Technology. An in-depth look at the past, present and future developments of microwave oscillator technology / A.P.S. (Paul) Khanna // Microwave Journal. – 2006. – V. 49, N4. – P. 22.
12. Белоус, О. И. Квазиоптические резонансные системы в приборах твердотельной электроники миллиметровых и субмиллиметровых длин волн / О. И. Белоус, А. А. Кириленко, А. И. Фисун // Радиофизика и электроника. – 2008. – Том 13. – С. 377-390.

References (transliterated)

1. Kundenko, N. P., Cherenkov, A. D. Analiz metodov postroeniya istochnikov KVCH izlucheniya s vysokoj stabilnostyu ih chastoty. Eastern-European journal of enterprise technologies, 2012, 2/8 (56), 18-22.
2. Miroshnichenko, V. S. Competition and Cooperation of Modes in Small-Volume DRO with Periodic Structure of Coupled Grooved Waveguide. Telecommunications and Radio Engineering, 2009, 68, N 3, 231–245, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v68.i3.30.
3. Skresanov, V. N., Glamazdin, V. V., Fisun, A. I., Shubnyi, A. I. Active Quasi-Optical Refractometer in the extremely High Frequencies (EHF) Band. Telecommunications and Radio Engineering, 2016, 75, 1, 83–96, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.70.
4. Onisto, H. J., Cavasso-Filho, R. L., Scalabrin, A., Pereira, D., Cruz, F. C. Frequency doubled and stabilized all-solid-state Ti:sapphire lasers. Opt. Eng. 2002, 41, 1122–1127, doi: 10.1117/1.1466850.
5. Bilous, O. I., Fisun, A. I., Kirilenko, A. A., Natarov, M. P., Shubnyi, A. I., Sirenko, S. P. Quasi-optical millimeter wave solid-state oscillators. Part 2: high-stable oscillators and application. Telecommunications and Radio Engineering, 2019, 78 (4), 341-361, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i4.50.
6. Fisun, A. I. Dolgovremennaya stabilizaciya chastoty kvaziopichteskikh tverdotelnyh generatorov KVCh-diapazona. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy, 1998, 3, № 5, 56-59.
7. Belous, O. I., Sukhoruchko, O. N., Fisun, A. I. Power and Spectrum Performance of Quasi-Optical solid-state MM-Wave Oscillator. Telecommunication and Radio Engineering, 2006, 65, № 16, 1501-1513, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i16.50.
8. Olkhovskiy, I. P., Sukhoruchko, I. P., Rud, L. A., Fisun, A. I. Vhodnoj maloshumyashij tverdotelnyj modul

- millimetrovogo diapazona voln. *Radiotekhnika*, 2003, **132**, 87-93.
9. Arhipov, A. V., Fisun, A. I., Bulgakov, B. M., Boltovets, M. S. Stabilizaciya chastoty tverdotelnyh istochnikov mm diapazona. Rezonansnye sistemy. Materialy 14-oy mezhdunarodnoj krymskoj konf. «SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii», Sevastopol, 2004, 119-120.
 10. Fisun, A. I., Belous, O. I. Kvaziopticheskie tverdotelnye istochniki izlucheniya: principy postroeniya, tendencii razvitiya i perspektivy prilozhenij. *Zarubezhnaya elektronika. Uspehi sovremennoj radioelektroniki*, 1999, **4**, 41-64.
 11. Khanna, A. P. S. (Paul). Microwave Oscillators: The State of the Technology. An in-depth look at the past, present and future developments of microwave oscillator technology. *Microwave Journal*, 2006, **49**, 4, 22.
 12. Belous, O. I., Kirilenko, A. A., Fisun, A. I. Kvaziopticheskie rezonansnye sistemy v priborah tverdotelnoj elektroniki millimetrovym i submillimetrovym dlin voln. *Padiofizika i elektronika*, 2008, **13**, 377-390.

Сведения об авторах (About authors)

Ольховский Иван Петрович – Харьковский колледж Государственного университета телекоммуникаций, преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей; г. Харьков, Украина; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Ivan Olkhovskiy – lecturer, Kharkiv College of State University of Telecommunications; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Фисун Анатолий Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела твердотельной электроники Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины (ИРЭ НАНУ), г. Харьков, Украина; e-mail: FisunAI@nas.gov.ua.

Anatoly Fisun – Doctor of phys.-math. sciences, professor, leading researcher of the solid-state electronics department of the A.Ya. Usikov Institute of Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine (IRE NASU), Kharkiv, Ukraine; e-mail: FisunAI@nas.gov.ua.

Фурсов Анатолий Митрофанович – кандидат физико-математических наук, преподаватель, Харьковский патентно-компьютерный колледж; г. Харьков, Украина; olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Anatoliy Fursov - PhD, lecturer, Kharkiv patent-computer college; Kharkiv, Ukraine; e-mail: olkhovskiy_i_p@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ольховский, И. П. Твердотельный генератор КВЧ диапазона с повышенной долговременной стабильностью частоты / И. П. Ольховский, А. И. Фисун, А. М. Фурсов // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 43-48. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.06.

Please cite this article as:

Olkhovskiy, I., Fisun, A., Fursov, A. Solid-state generator of EHF range with increased long-term frequency stability. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 43-48, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.06.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ольховський, І. П. Твердотільний генератор КХЧ діапазону з підвищеною довготривалою стабільністю частоти / І.

П. Ольховський, А. І. Фісун, А. М. Фурсов // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 43-48. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.06.

АНОТАЦІЯ Наведено спосіб довготривалої стабілізації частоти твердотільного генератора КХЧ діапазону шляхом підтримки постійної температури резонансної системи. В якості такої системи використовується відкритий резонатор, резонансна частота якого в основному визначається його довжиною. Температура резонатора контролювалася напівпровідниковим датчиком, а стабілізація температури здійснювалася за допомогою елементів Пельтьє, підключених між тепловиділяючим елементом (діодом Ганна) і радіатором. Для узгодження високодобреотного відкритого резонатора з низькоімпедансним джерелом електрических коливань застосовано багатоланкове узгодження активного елементу і відкритого резонатора, яке розріджує спектр вихідного сигналу як по поперечних, так і по повздовжніх тилах коливань. Частота генерації з діодом Ганна склала 36 ГГц, модуляційна характеристика генератора $S = \Delta f / \Delta U_d = 6 \text{ МГц/V}$, вихідна потужність не менше 50 мВт, точність контролю температури $t = \pm 1^\circ\text{C}$ в інтервалі зміни зовнішньої температури $-20 - +30^\circ\text{C}$, робоча температура 35°C . В результаті генератор з відкритим резонатором мав дрейф частоти менше 0,5 МГц протягом 7 годин. Для порівняння дрейф частоти аналогічного генератора з хвилевидним резонатором за той же час склало близько 20 МГц. До того ж генератор з відкритим резонатором і термостабілізацією виходив на режим стабілізації частоти. Стабільність частоти, яка оцінюється по мітках аналізатора спектру, не гірше ніж $1 \cdot 10^{-7} \text{ хв}^{-1}$. Довготривала температурна стабільність $(\Delta f)/T = \pm 1 \cdot 10^{-6}/\text{°C}$. Слід зазначити, що резонатор збуджується на квазіосновному типі коливань, що дозволяє здійснити додаткову зміну частоти за рахунок зміни довжини L резонатора $\sim 0,25 \text{ ГГц}$ при зниженні потужності генерації на 3 дБ. Подібним методом можна також створити твердотільні джерела з довготривалою стабільністю в області частот 150-300 ГГц.

Ключові слова: частота; довготривала стабілізація частоти; твердотільний генератор; температура; КХЧ діапазон; відкритий резонатор

Поступила (received) 03.10.2019

РАЗРАБОТКА ОБУЧАЮЩЕЙ ИГРЫ «WEB-ТЕХНОЛОГИИ»

И. Н. ЕГОРОВА, Л. А. КОЧУРА*

кафедра Медиасистем и технологий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, УКРАИНА
*e-mail: l_kochura@yahoo.com

АННОТАЦИЯ В работе предложена модель обучающей игры с многоуровневой иерархической структурой. Игра рассчитана на пользователей разного уровня подготовки - как абитуриентов, так и студентов, и реализована в виде приложения для мобильных устройств на базе операционной системы *Android*. Игра разработана с целью повышения интереса пользователей к дисциплинам стека WEB-технологии, а также для улучшения эффективности обучения в целом. Разработана многоуровневая структура игры, содержащая различные уровни представления данных. На нижних уровнях находится информация по языкам HTML, CSS, PHP, необходимая для создания собственного сайта. На верхнем уровне расположена информация касательно инструментов SEO, знание которых позволяет оптимизировать сайт и продвинуть его в зону видимости информационно-поисковых систем. Для абитуриентов доступна информация первого базового уровня иерархической структуры игры, которая позволяет ознакомить пользователя с основными понятиями и практическими аспектами в области WEB-технологий. Студенты, в свою очередь, получают доступ ко всей информации. Схема навигации игры представлена в виде UML-диаграммы. Игра рассчитана на пользователей возрастом 16-22 года и имеет ограничения по доступу к тестовой части игры - только зарегистрированным пользователям. На подготовительном этапе разработки игры проведен опрос с целью выявления наиболее значимых показателей, влияющих на ее качество. Обработка данных осуществлена посредством метода экспертных оценок. Среди предложенных вариантов наиболее значимыми оказались: дизайн и скорость работы, удобство навигации, контент игры, возможность проходить тематические тесты. По завершении разработки игры применены методы анкетирования и интервью, которые позволили оценить полученные результаты, определить уровень разработанного приложения и целесообразность его внедрения. Проведенный анализ опроса показал, что мнения экспертов являются согласованными. Игра в целом соответствует ожиданиям экспертов и целесообразна для внедрения. Разработанное приложение позволяет осуществить обучение в игровой форме и, в целом, повысить заинтересованность пользователей в изучении дисциплин стека WEB-технологии.

Ключевые слова: обучающая игра; веб-технологии; мобильное приложение; структура; UML-диаграмма

DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL GAME “WEB TECHNOLOGIES”

I. IEGOROVA, L. KOCHURA

Department of Media Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper proposes a model of an educational game with a multi-level hierarchical structure. The game is designed for users with different background levels - both applicants and students. The game is implemented as an application for mobile devices based on the Android operating system and designed to increase user interest to the disciplines of the WEB technology stack, as well as to improve the effectiveness of training in general. A multi-level structure of the game is developed, containing various levels of data representation. The lower levels contain information on the HTML, CSS, and PHP languages needed to create own website. Upper level contains information regarding SEO tools, the knowledge of which allows website optimization and promotion to the visibility range of information retrieval systems. Information for the first basic level of the hierarchical structure of the game is available for applicants, which allows familiarizing the user with the basic concepts and practical aspects in the field of WEB-technologies. Students, in turn, gain access to all information. The navigation scheme of the game is presented as a UML diagram. The game is designed for users aged 16-22 and has restrictions on access to the test part of the game – only to registered users. At the preparatory stage of game development, a survey was conducted to identify the most significant indicators that affect quality. Data processing is carried out using the method of expert assessments. Among the proposed options, the most significant were: design and speed, ease of navigation, game content and the ability to pass thematic tests. Upon completion of the development of the game, questionnaire and interview methods were applied, which made it possible to evaluate the results obtained, determine the level of the developed application and the appropriateness of implementation. The survey analysis showed that the opinions of experts are consistent. The game meets the expectations of experts in general and is suitable for implementation. The developed application allows for training in a playful way and, in general, to increase the interest of users in studying the disciplines of the WEB technology stacks.

Keywords: educational game; web technologies; mobile application; structure; UML-diagram

Введение

В настоящее время на смену традиционным методам обучения, таким как лекции и практические занятия, приходят все новые, зачастую более эффективные интерактивные методы, например, игры

[1]. Такие методы обучения обеспечивают большую вовлеченность обучающихся в процесс и способствуют лучшему усвоению материала.

Существует множество мобильных приложений, целью которых является обучение пользователей [2,3]. Такие приложения зачастую

используют игровые методы, которые позволяют участникам, в ненавязчивой форме получать новые знания и навыки.

Игровые методы обучения могут быть востребованы не только студентами, но и абитуриентами в процессе их ознакомления с будущей специальностью. Таким образом, обучающие игры способствуют повышению эффективности обучения пользователей разного уровня подготовки [4,5].

Цель работы

Целью работы является разработка модели обучающей игры и ее реализация в виде мобильного приложения.

Изложение основного материала

Игра «WEB-технологии» разработана для мобильных устройств на базе операционной системы Android [6]. Образовательные площадки на базе Android хорошо себя зарекомендовали в разных предметных областях [7-9]. Внедрение таких приложений является распространённой практикой для многих стран [10,11].

Игра разработана с целью повышения интереса как студентов, так и абитуриентов к дисциплинам стека WEB-технологии, а также для улучшения эффективности обучения в целом [4].

Формально модель игры представлена в виде:

$$M(V) = \langle M(KB), M(TT), M(D), M(QA) \rangle, \quad (1)$$

где $M(V)$ – модель игры, $M(KB)$ – модель базы данных игры, $M(TT)$ – модель тематических тестов, $M(D)$ – декларативная модель, $M(QA)$ – модель вопросно-ответных отношений между игроками и администратором игры.

База данных игры содержит теоретическую информацию по каждой из тем.

Игра имеет многоуровневую иерархическую структуру и рассчитана на пользователей разного уровня подготовки. Целью прохождения игры является получение необходимого набора знаний для создания собственного сайта. Так, на первом нижнем уровне игры находится информация по базовому синтаксису языков HTML и CSS, которой достаточно для создания простейшего web-сайта. На втором, более высоком уровне, находятся данные, касающиеся расширения языков HTML (элемент Canvas и др.) и CSS (Media queries, Animation и др.), а также информация касательно языка PHP. На третьем, еще более высоком уровне, находится теоретическая информация по SEO (Search Engine Optimization), изучение которой позволит пользователям оптимизировать сайт и продвинуть его в информационно-поисковых системах. Таким образом,

прохождение первых двух уровней игры позволит пользователям получить информацию, необходимую для создания собственного web-сайта, а прохождение третьего уровня поможет им в продвижении сайта в зону видимости (рис.1).

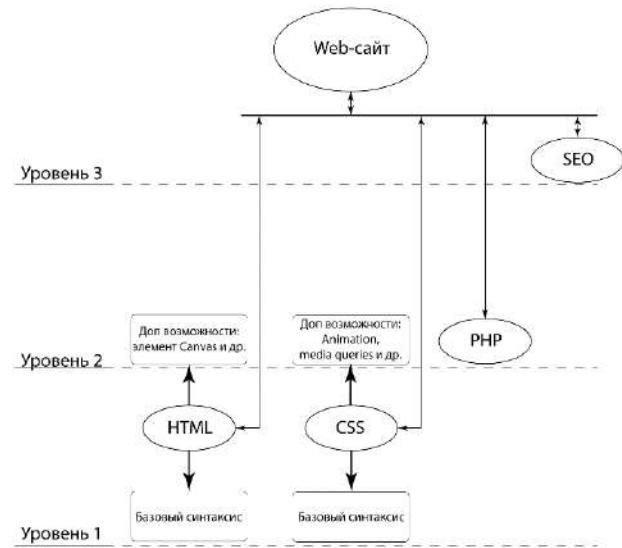


Рис. 1 – Многоуровневая структура игры

Модель тематических тестов содержит информацию с вопросами для тестов по каждой из тем базы данных игры.

Декларативная модель игры содержит информацию описательного характера о контактах, новостях профилирующей кафедры и университета.

Модель вопросно-ответных отношений между игроками и администратором игры подразумевает следующую последовательность действий:

- пользователь выбирает тему теста;
- система игры случайным образом генерирует тематические вопросы и отображает их пользователю;
- пользователь выбирает вариант ответа на вопрос;
- система сравнивает полученный ответ с верным вариантом, после чего отображает сообщение с результатом: верно (неверно) и правильным ответом на вопрос. В случае неверного ответа накопленные баллы не уменьшаются. За каждый верный ответ пользователь получает 1 балл;
- пользователь может ознакомиться с результатами прохождения тематического теста и игры в целом.

Описание структуры игры осуществлено с применением UML-моделирования. Так, диаграмма использования отображает схему навигации игры (рис. 2).

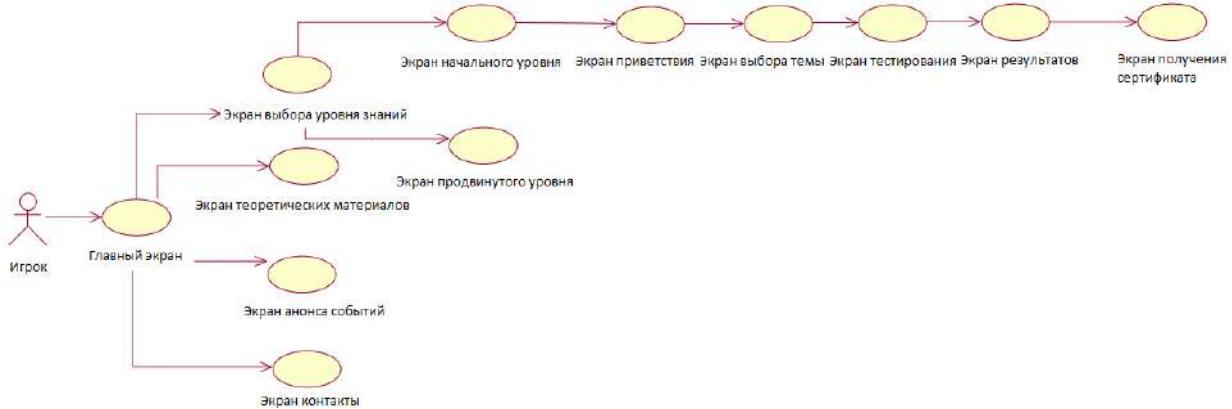


Рис. 2 – Схема навигации игры

Диаграмма демонстрирует основные экраны игры. Игроком выступает абитуриент или студент. В соответствии с уровнем подготовки пользователей существуют различные варианты сложности игры. Так, для абитуриентов доступна информация первого базового уровня иерархической структуры игры, которая позволяет ознакомить пользователя с основными понятиями и практическими аспектами в области WEB-технологий. Студенты, в свою очередь, получают доступ к информации всех трех уровней иерархической структуры игры.

Ориентировочный возраст пользователя – 16-22 года. У пользователя есть персональный смартфон на базе Android.

Игра предусматривает одинаковое количество накопительных баллов в зависимости от проходной темы (5 за каждую). Количество попыток пройти тест по теме не ограничено. На игру не накладываются временные ограничения. Однако, наложены ограничения по доступу к тестовой части игры- доступ разрешен только зарегистрированным пользователям [5].

После прохождения каждой из тем пользователь имеет возможность распечатать сертификат, содержащий информацию об общем количестве баллов, накопленных за игру.

Интерактивная игра предусматривает также процесс общения между работниками высшего учебного учреждения (кафедры) и пользователями.

Игра «WEB-технологии» разработана в программной среде Android Studio [12].

С целью выявления наиболее значимых показателей, влияющих на качество игры, был проведен опрос 25 учащихся 10 класса. Обработка данных осуществлена посредством метода экспертных оценок. Максимальная 10 бальная оценка присваивалась наиболее важному показателю, соответственно оценка в 1 балл- наименее важному.

Среди предложенных вариантов наиболее значимыми оказались: дизайн и скорость работы, удобство навигации, контент игры, возможность проходить тематические тесты. Менее значимые показатели: простота авторизации, низкий порог

вхождения, возможность ознакомиться с информацией о кафедре и университете.

Наименее важным оказался показатель «получение сертификата».

Таким образом, результаты проведенного опроса позволили выявить набор наиболее важных показателей, с учетом которых необходимо провести разработку игры.

Разработка игры осуществлена с учетом общепринятых стандартов создания UI/UX дизайна. Информационное наполнение теоретической (декларационной) части игры проведено по материалам дисциплин стека «WEB-технологии».

Внешний вид экранов игры представлен на рис. 3.

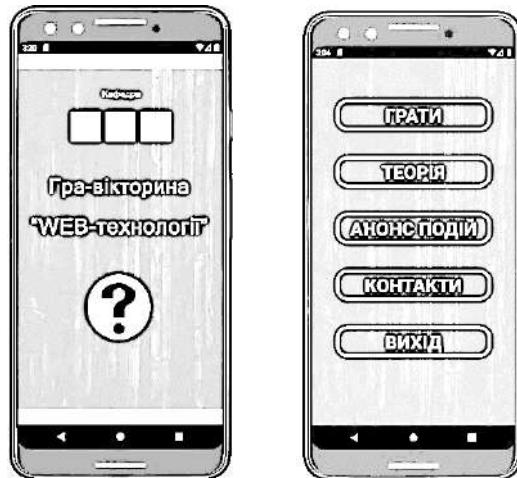


Рис. 3 – Внешний вид главного экрана и меню игры «WEB-технологии»

Обсуждение результатов

По завершении разработки игры проведен опрос экспертов с целью валидации приложения, т.е. определения его соответствия заявленным требованиям. В качестве экспертов выступили учащиеся 11 классов, которым была предоставлена анкета с выбранными при первом опросе

показателями. Оценка игры осуществлялась по 10-балльной шкале, где максимальная оценка в 10 баллов присваивалась показателю в том случае, если он был реализован в полной мере, соответственно минимальная оценка в 1 балл- если показатель не реализован вовсе.

Проведенный анализ опроса показал, что мнения экспертов являются согласованными, а игра в целом соответствует ожиданиям экспертов.

Интервьюирование экспертов позволило определить целесообразность использования игры для ознакомления абитуриентов с будущей специальностью (20 из 25 экспертов высказались положительно).

Выводы

Таким образом, разработана модель обучающей игры с многоуровневой иерархической структурой. Игра рассчитана на пользователей разного уровня подготовки - как абитуриентов, так и студентов. Игра реализована в виде приложения для мобильных устройств на базе операционной системы Android.

Разработанное приложение позволяет осуществить обучение в игровой форме и, в целом, повысить заинтересованность пользователей в изучении дисциплин стека WEB-технологии.

Список литературы

1. Метешкин, К. А. Когнитивное моделирование в игровых методах обучения / К. А. Метешкин, О. И. Морозова, Л. А. Kochura // Радиоэлектронні та комп'ютерні системи. – 2016. – №3 (77). – С. 41-48.
2. Rondon, S. Computer game-based and traditional learning method: a comparison regarding students' knowledge retention / S. Rondon, F. C. Sassi, C. R. Furquim de Andrade // BMC Medical Education volume. – 2013. – №13. – 30. – doi: 10.1186/1472-6920-13-30.
3. Papastergiou, M. Digital Game-Based Learning in high school Computer Science education: Impact on educational effectiveness and student motivation / M. Papastergiou // Computers & Education. – 2009. – № 1(52). – P. 1–12. – doi:10.1016/j.compedu.2008.06.004.
4. Єгорова, І. М. Особливості використання гри в інтерактивних методах навчання / І. М. Єгорова, Л. О. Kochura // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень". – Вінниця, грудень 2018. – С. 60-63.
5. Єгорова, І. М. Особливості впровадження ігрових методів навчання / І. М. Єгорова, Л. О. Kochura // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології друкарства алгоритми, сигнали, системи «Друкотехн-2018». – Львів, 15-16 листопада 2018. – С. 152-154.
6. Bhutto, A. An Android Based Cooperative Knowledge Acquiring Application / A. Bhutto, D. Hussain // Mehran University Research Journal of Engineering & Technology. – 2018. – №3 (37). – P. 453–460. – doi: 10.22581/muet1982.1803.01.
7. Desnelita, I. Counseling Model Application: A Student Career Development Guidance for Decision Makerand Consultation. International Conference on Environment and Technology, 2017, 1 (97), 1–6, doi: 10.1088/1755-1315/97/1/012045.
- Consultation / I. Desnelita , G. Desnelita, S. Desnelita, Y. Desnelita // International Conference on Environment and Technology. – 2017. – №1 (97). – P. 1–6. – doi: 10.1088/1755-1315/97/1/012045.
8. Huijengaa, J. Mobile game-based learning in secondary education: Students' immersion, game activities, team performance and learning outcomes / J. Huijengaa, W. Admiraalb, G. Damc, J. Voogtc // Computers in Human Behavio. – 2019. – №99. – P. 137–143. – doi:10.1016/j.chb.2019.05.020.
9. Acquah, E. Digital game-based L2 learning outcomes for primary through high-school students: A systematic literature review / E. Acquah, H. Katz // Computers & Education. – 2020. – №143. – P. 103667. – doi:10.1016/j.compedu.2019.103667.
10. Perinia, S. Learning and motivational effects of digital game-based learning (DGBL) for manufacturing education –The Life Cycle Assessment (LCA) game / S. Perinia, R. Lugliettia, M. Margoudib, M. Oliveirac, M. Taischa // Computers in Industry. – 2018. – №102. – P. 40–49. – doi:10.1016/j.compind.2018.08.005.
11. Gallegos C. The use of a game-based learning platform to engage nursing students: A descriptive, qualitative study / C. Gallegos, A. Tesar, K. Connor, K. Martz // Nurse Education in Practice. – 2017. – №27. – P. 101–106. – doi:10.1016/j.npr.2017.08.019.
12. Orekhov, V. I. Annotation and Visualization in Android: An Application for Education and Real Time Information / V. I. Orekhov, T. R. Orekhova // Міжнародний научний журнал «Символ науки». – 2015. – №2. – Р. 242–244.

References (transliterated)

1. Meteshkin, K. A., Morozova, O. I., Kochura L. A. Cognitive modeling in game teaching methods. *Radio electronics and computer system*, 2016, 3 (77), 41–48.
2. Rondon, S., Sassi, F. C., Furquim de Andrade C. R. Computer game-based and traditional learning method: a comparison regarding students' knowledge retention. *BMC Medical Education volume*, 2013, 13, 30, doi:10.1186/1472-6920-13-30.
3. Papastergiou, M. Digital Game-Based Learning in high school Computer Science education: Impact on educational effectiveness and student motivation / M. Papastergiou // *Computers & Education*, 2009, 1(52), 1–12, doi:10.1016/j.compedu.2008.06.004.
4. Iegorova, I., Kochura, L. O. Special features of the gris in interactive methods of navigation. *Materials of the International Science-and-Technology Conference "Computer Graphics and Pictures"*, Vinnitsya, 2018, 60-63.
5. Iegorova, I., Kochura, L. O. Special Features in igrovih Navigation Methods. *Materials of the VII International Science and Technology Conference "Information Technology of Algorithms, Algorithms, Signals and Systems" Drukotehn-2018* ", 2018, Lviv, Ukraine, 152-154.
6. Bhutto, A., Hussain, D. An Android Based Cooperative Knowledge Acquiring Application. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 2018, 3(37), 453-460, doi: 10.22581/muet1982.1803.01.
7. Desnelita, I., Desnelita, G., Desnelita, S., Desnelita, Y. Counseling Model Application: A Student Career Development Guidance for Decision Makerand Consultation. *International Conference on Environment and Technology*, 2017, 1 (97), 1–6, doi: 10.1088/1755-1315/97/1/012045.

8. **Huizengaa, J., Admiraalb, W., Damc, G., Voogtc J.** Mobile game-based learning in secondary education: Students 'immersion, game activities, team performance and learning outcomes. *Computers in Human Behavior*, 2019, **99**, 137–143, doi: 10.1016/j.chb.2019.05.020.
9. **Acquah, E., Katz H.** Digital game-based L2 learning outcomes for primary through high-school students: A systematic literature review. *Computers & Education*, 2020, **143**, 103667, doi: 10.1016/j.compedu.2019.10.106666.
10. **Perinia, S., Lugliettia, R., Margoudib, M., Oliveirac, M., Taischa M.** Learning and motivational effects of digital game-based learning (DGLB) for manufacturing education –The Life Cycle Assessment (LCA) game. *Computers in Industry*, 2018, **102**, 40–49, doi: 10.1016/j.compind.2018.08.005.
11. **Gallegos C., Tesar, A., Connor, K., Martz K.** The use of a game-based learning platform to engage nursing students: A descriptive, qualitative study. *Nurse Education in Practice*, 2017, **27**, 101-106, doi: 10.1016/j.nepr.2017.08.019.
12. **Orehov, V. I., Orehova, T. R.** Annotation and Visualization in Android: An Application for Education and Real Time Information. *International scientific journal "Symbol of Science"*, 2015, **2**, 242–244.

Сведения об авторах (About authors)

Егорова Ирина Николаевна – к.т.н., доцент, профессор кафедры Медиасистем и технологий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.egorova@nure.ua.

Irina Iegorova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor of Department of media systems and technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.egorova@nure.ua.

Кочура Любовь Алексеевна – магистрант, кафедра Медиасистем и технологий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: l_kochura@yahoo.com.

Liubov Kochura – Master's Degree, Department of media systems and technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; Email: l_kochura@yahoo.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Егорова, И. Н. Разработка обучающей игры «WEB-технологии» / **И. Н. Егорова, Л. О. Кочура** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 49-53. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.07.

Please cite this article as:

Iegorova, I., Kochura, L. Development of educational game “WEB technologies”. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 49-53, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.07.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сторова, І. М. Розробка навчальної гри «WEB-технології» / **І. М. Сторова, Л. О. Кочура** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 49-53. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.07.

АННОТАЦІЯ В роботі запропоновано модель навчальної гри із багаторівневою ієрархічною структурою. Гру розраховано на користувачів різного рівня підготовки – як абітурієнтів, так і студентів, та реалізовано у вигляді додатку для мобільних пристроїв на базі операційної системи *Android*. Гру розроблено із метою підвищення інтересу користувачів до дисциплін стеку WEB-технології, а також задля покращення ефективності навчання в цілому. Розроблено багаторівневу структуру гри, що містить різні рівні подання даних. На нижніх рівнях знаходитьться інформація із мов HTML, CSS, PHP, необхідна для створення власного сайту. На верхньому рівні розташовано інформацію щодо інструментів SEO, знання яких дозволяє оптимізувати сайт та просунути його до зони видимості інформаційно-пошукових систем. Для абітурієнтів доступна інформація першого базового рівня ієрархічної структури гри, що дозволяє ознайомити користувача із основними поняттями та практичними аспектами у галузі WEB-технологій. Студенти, в свою чергу, отримують доступ до всієї інформації. Схему навігації гри представлено у вигляді UML-діаграми. Гру розраховано на користувачів віком 16-22 роки та має обмеження із доступу до тестової частини гри – тільки зареєстрованим користувачам. На підготовчому етапі розробки гри було проведено опитування із метою виявлення найбільш значущих показників, що впливають на її якість. Обробку даних здійснено за допомогою експертних оцінок. Серед запропонованих варіантів найбільш значущими виявилися: дизайн та швидкість роботи, зручність навігації, контент гри, можливість проходити тематичні тести. По завершенню розробки гри були застосовані методи анкетування та інтерв'ю, що дозволили оцінити отримані результати та визначити рівень розробленого додатку та доцільність його впровадження. Проведений аналіз опитування показав, що думки експертів є узгодженими. Гра в цілому задовільняє очікування експертів та доцільна до впровадження. Розроблений додаток дозволяє здійснити навчання в ігровій формі та, в цілому, підвищити зацікавленість користувачів до вивчення стеку WEB-технологій.

Ключові слова: навчальна гра; веб-технології; мобільний додаток; структура; UML-діаграма

Поступила (received) 01.10.2019

О ПРОЦЕДУРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ

М. А. ХРЕБЕТ*, Г. Н. КОДОЛА, И. В. СЕРБУЛОВА

кафедра Информационных систем, ГВУЗ УГХТУ, Днепр, УКРАИНА

*e-mail: khrebet.michael@gmail.com

АННОТАЦІЯ В современных реалиях процедурная генерация контента является одним из наиболее востребованных и перспективных направлений в среде разработки игр. В наше время качественно выполненный и хорошо продуманный алгоритм процедурной генерации может взять на себя большую часть работы по созданию уникального контента во время разработки игры, или же во время самого игрового процесса. С помощью процедурной генерации можно в кратчайшие сроки создать набор уникальных объектов. Существует большое разнообразие всевозможных алгоритмов процедурной генерации, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы, и лучше всего подходит к определенному типу заданий. В данной статье речь пойдет об алгоритмах, которые могут быть использованы для создания трехмерного игрового уровня, что позволит значительно сократить время на работу по созданию таких уровней, а также позволит повысить уникальность каждого сгенерированного уровня. В качестве примера для ознакомления в тексте статьи изложено пять существующих алгоритма процедурной генерации, которые так или иначе позволяют сгенерировать трехмерный игровой уровень. Конечной целью является нахождение оптимального алгоритма процедурной генерации, который будет удовлетворять главному критерию отбора – создание полноценного игрового уровня с ландшафтом и объектами, который не нуждается в дальнейшей доработке. В данный момент существует не так много игр, которые успешно используют алгоритмы процедурной генерации при создании полноценного трехмерного игрового мира – к наиболее известным играм можно отнести Minecraft, No Man's Sky и Deep Rock Galactic. Итоговым результатом исследования стало нахождение наиболее приемлемого алгоритма процедурной генерации, с помощью которого можно в реальном времени генерировать уникальные игровые уровни. В качестве основного требования к алгоритму выступало отсутствие необходимости дальнейшей работы с созданным уровнем, потому как использование данного алгоритма планируется в первую очередь для разнообразия игрового процесса и создания большего элемента случайности. В результате фаворитом оказался алгоритм разделения уровня на сектора, ввиду выполнения им основного условия, а также возможности программирования нескольких условий.

Ключевые слова: процедурная генерация контента; алгоритм; уровень игры; трехмерная генерация; компьютерная игра; игровой ландшафт

ABOUT THREE-DIMENSIONAL PROCEDURE VIRTUAL SPACES

M. KHREBET, G. KODOLA, I. SERBULIOVA

Department of Information Systems, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT In modern realities, procedural content generation is one of the most popular and promising areas in the game development environment. Nowadays, a well-executed and well-designed procedural generation algorithm can take on most of the work of creating unique content during game development, or during the game itself. Using procedural generation, you can quickly create a set of unique objects. There is a wide variety of various procedural generation algorithms, each of which has its pros and cons, and is best suited to a specific type of task. This article focuses on algorithms that can be used to create a three-dimensional game level, which will significantly reduce the time for creation of such levels, and will also increase the uniqueness of each generated level. As an example, in the text of the article, five existing algorithms of procedural generation are described, which in one way or another makes it possible to generate a three-dimensional game level. The ultimate goal was to find the optimal procedural generation algorithm that will satisfy the main selection criterion – the creation of a full-fledged game level with landscape and objects, which does not need further refinement. At the moment, there aren't many games that successfully use procedural generation algorithms to create a full-fledged three-dimensional game world – the most famous games are Minecraft, No Man's Sky and Deep Rock Galactic. The final result of the study was to find the most acceptable procedural generation algorithm with which it is possible to generate unique game levels in real time. The main requirement for an algorithm was the lack of the need for further work with a created level, because the use of this algorithm is planned primarily for a variety of gameplay and creation of a larger element of randomness. As a result, the best one was the algorithm for dividing a level into sectors, due to the fulfillment of the main condition, as well as the possibility of programming several conditions.

Keywords: procedural content generation; algorithm; level of play; three-dimensional generation; computer game; game landscape

Введение

Процедурная генерация в современном мире снискала себе большую любовь, как разработчиков,

так и рядовых игроков. Она нашла себе применение в самых разных областях, но наиболее часто ее применяют при разработке компьютерных игр.

При помощи различных алгоритмов процедурной генерации можно наполнить игру несчетным количеством игрового контента. Один и тот же алгоритм процедурной генерации может отвечать, как за создание непохожих друг на друга деревьев, так и за полную генерацию игрового уровня.

В последнее время с помощью алгоритмов процедурной генерации часто создают различные виды оружия, присутствующие в игре, здания и их наполненность, лица и имена неигровых персонажей, также известных как НПС, а также большую часть растений в игре. В качестве примера можно привести игру *Borderlands* [1].

Также существует множество аналогов процедурной генерации, которые очень часто используются в настольных играх. К таким аналогам можно отнести составление случайных колод во многих играх, перемешивание между собой составных частей разных колод игровых событий и еще много чего [2]. Однако у таких аналогов есть один значительный недостаток – такая генерация не может быть многоуровневой.

К примеру, нужно составить игровую колоду, в которую будет включен случайный набор карт – это сделать довольно просто. Однако нельзя создать дополнительное условие, при котором в колоду добавится еще один набор карт, если в первый раз была добавлена определенная карта. Если сказать это прямым текстом – игра утратит интригу случайности, ведь игроки уже будут знать, что за карты лежат в колоде. Таким образом, выходит, что в настольных аналогах процедурной генерации нельзя использовать многоуровневые условия, иначе будут утрачены случайность и интрига.

В то же время в компьютерных алгоритмах процедурной генерации игроки не видят, что происходит в алгоритме и выполняются ли какие-то определенные условия. То есть программист, создавший алгоритм, может запрограммировать любое количество условий, с любым количеством уровней этих условий, ведь конечный пользователь в любом случае не будет видеть, какие условия выполняются, а какие нет. Таким образом, получается, что игрок, который у себя на экране видит только конечный результат, не будет знать какие варианты развития алгоритма были выбраны, и к чему это может привести, то есть момент интриги, при котором каждый последующий запуск будет чем-то новым для игрока, сохраняется.

Наглядно увидеть, как происходит многоуровневый выбор в алгоритмах процедурной генерации можно на рис. 1.

Таким образом, при выборе варианта А для дальнейшей генерации уровня в игре, перед алгоритмом появляется выбор – использовать вариант А1 или же А2. В то же время при использовании вариантов Б или В такого выбора не появляется.

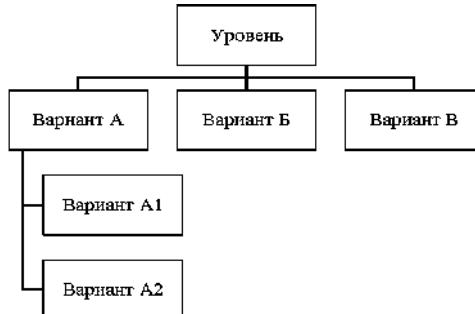


Рис. 1 – Многоуровневый выбор

Однако процедурная генерация полных игровых уровней снискала себе не настолько большую славу. Чаще всего если к алгоритмам процедурной генерации прибегают при создании игровых уровней, то это будут двумерные уровни, которые находятся только в одной плоскости. Генерация трехмерных уровней – это процесс куда более сложный и трудоемкий, чем генерация двумерных уровней, а то и наполнения в игре.

При написании алгоритма процедурной генерации трехмерных виртуальных пространств нужно обратить внимание на очень большое количество факторов. Например, максимально допустимая высота карты, уровень воды на карте, будут ли на карте располагаться поселения людей, выстраивание общей логистики на карты, а также общий вид карты и степень ее реализма.

Цель работы

Главной целью работы является определение алгоритма процедурной генерации, который сможет создавать полноценный игровой уровень, не требующий последующей значительной доработки человеком.

Изложение основного материала

Исследования в области универсальных игровых программ были в первую очередь ориентированы на изучение алгоритмов искусственного интеллекта, и генерация игр в них либо не рассматривалась вовсе, либо была основана на простейших алгоритмах.

Исследованиям процедурной генерации игр посвящены работы К. Брауна [3], В. Хома и Д. Маркса [4], Дж. Тогелиуса [5] и М. Кука [6]. Существующие экспериментальные решения ориентированы на генерацию игр нескольких отдельных жанров.

В работе [7] представлена разработка алгоритма процедурной генерации игрового уровня, который строится из клеток в зависимости от различных вариантов построения уровня – с четкими и свободными границами, формирования самих клеток с возможными вариантами выходов,

построения их набора и реализации проходов между соседними клетками.

Перспективным направлением для дальнейших исследований является улучшение существующих и создание новых алгоритмов генерации с целью повышения качества и разнообразия генерируемых игр.

Для выполнения задачи построения алгоритма процедурной генерации трехмерного игрового уровня можно привести несколько возможных методов [8–11]. Каждый из таких методов имеет свои достоинства и недостатки, руководствуясь которыми программисту следует подбирать нужный метод под каждую ситуацию индивидуально.

Вот пример нескольких алгоритмов процедурной генерации [4–6,11]:

1. Построение карты при помощи наложения текстур на трехмерную модель математической функции.

В данном варианте для создания общего ландшафта игрового уровня создается графическая модель любой трехмерной математической функции. После построения трехмерного графика необходимо нанести текстуры на всю поверхность модели. К несомненным плюсам данного способа можно отнести уникальность каждого уровня, а также максимальную сглаженность отдельных участков. В результате такого метода можно будет получить красивый и плавный ландшафт, однако все еще остается необходимость дальнейшей настройки игрового уровня вручную или с помощью других алгоритмов процедурной генерации.

К плюсам данного метода можно отнести уникальность каждого из построенных уровней, плавность ландшафта и целостность итогового результата.

К минусам же можно отнести обязательную необходимость последующей доработки результата вручную или с помощью других алгоритмов. Также данный метод не подходит для генерации резких ландшафтов, таких как горы или утесы, потому что графики всегда имеют более сглаженные очертания.

Наглядные примеры результатов работы алгоритма с математическими функциями (1) – (2) можно увидеть на рисунках 2–4.

$$f(x,y) = \frac{\sin(x)\sin(y)}{xy}; \quad (1)$$

$$f(x,y) = xy^3 - 3y^2 + 4x^4. \quad (2)$$

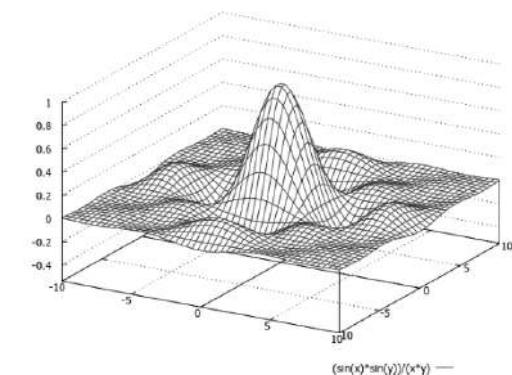


Рис. 2 – Пример формирования рельефа с помощью математических функций (1)

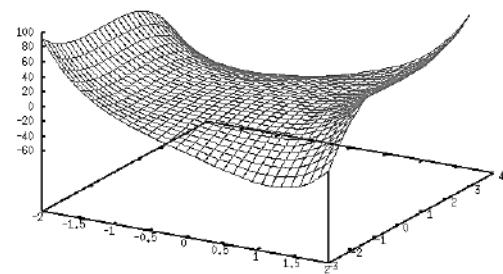


Рис. 3 – Пример формирования рельефа с помощью математических функций (2)

2. Создание набора отдельных взаимозаменяемых участков карты для дальнейшей их комбинации.

Данный метод подразумевает изначальное создание стартового набора разных участков карты. Весь уровень делится на равные сектора (зачастую квадраты), а также вручную создается карта высот уровня. Таким образом появляется набор секторов, карты высот каждого из них, а также их положение на общей карте уровня.

После этого каждый сектор дублируется несколько раз, создавая одинаковое количество копий каждого из участков карты. Затем каждая из копий может быть изменена, при соблюдении карты высот у краев каждого из секторов.

После этого у каждого сектора уровня появляется выборка – набор из разных секторов, с одинаковыми границами, которые являются взаимозаменяемыми. В таком случае очень удобно организовывать многоуровневую генерацию, создавая алгоритм с множеством условий. На каждом из секторов в свою очередь могут быть дополнительные условия, которые будут немного менять их наполнение.

Итогом такого метода является уровень, который при каждой последующей генерации будет создавать выборку из различных секторов, объединяя

их в общую карту уровню. Более наглядно это можно изобразить в виде таблицы:

Таблица 1 – Создание выборки из секторов

Сектор	Значение, которое сектор может принять				
A	1	2	3	4	5
Б	1	2	3	4	5
В	1	2	3	4	5

Таким образом получается, что во время одной генерации алгоритм определит, что сектор А может принять любое значение от 1 до 5, так же, как и сектора Б и В. То есть во время каждой новой генерации алгоритм будет выбирать новое случайное значение, шанс повторения которых крайне мал.

Данный способ позволяет гораздо лучше настроить рамки генерации, чем остальные методы, однако требует большой работы при создании секторов. Помимо этого, он также позволяет использовать многоуровневую генерацию.

К плюсам этого метода можно отнести высокую вариативность сгенерированных уровней, возможность высокого контроля генерации, возможность создания сложных структур и выделяющихся мест, а также ввод нескольких уровней условий.

К однозначным минусам же можно отнести необходимость выполнения большей части работы вручную, а также, при создании маленькой выборки или небольшого количества секторов, относительно небольшую вариативность сгенерированных уровней.

Результат работы такого алгоритма можно увидеть ниже на рис. 4.

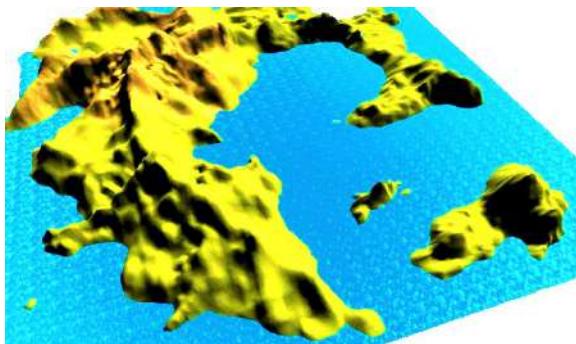


Рис. 4 – Пример сгенерированного уровня путем создания набора отдельных взаимозаменяемых участков карты

3. Разбиение карты на сектора правильной формы для полной генерации карты высот и дальнейшего ее сглаживания.

Данный метод подразумевает изначальное разделение всего игрового уровня на одинаковые сектора правильной формы, такие как квадраты или шестиугольники. Впоследствии эти сектора будут принимать случайное значение в заданном диапазоне,

для формирования карты высот данного уровня. Для того, чтобы сгенерированный уровень выглядел правдоподобно, необходимо добавить в алгоритм ряд проверок и зависимостей уровней высот соседних секторов. После генерации карты высот и ее применения необходимо будет сгладить весь уровень, чтобы убрать резкие различия между некоторыми секторами. Лучше всего данный метод используется при генерации относительно ровных местностей, в которых нет необходимости в резкой смене карты высот.

При использовании данного метода можно также увеличить его случайность, используя в качестве карты высот положение не самого сектора, а его вершин. При использовании шестиугольников таких вершин можно использовать 3 или 6.

На рисунке 5 ниже можно увидеть наглядный пример разбиения уровня на сектора из шестиугольников, а также использование в качестве карты высот трех вершин каждого из таких секторов.

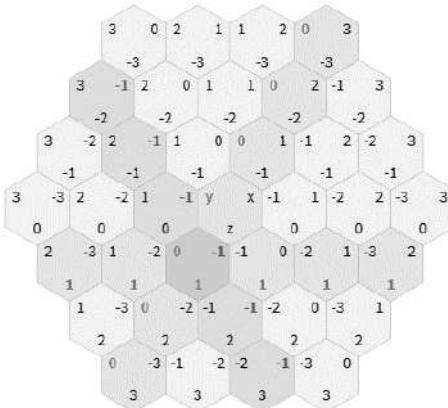


Рис. 5 – Пример разбиения уровня на сектора правильной формы

К плюсам данного метода можно отнести возможность быстрой генерации уровня с относительно гладким ландшафтом, а также приятный общий вид сгенерированного уровня.

В то же время одним из самых значимых минусов является необходимость дальнейшей доработки игрового уровня, ввиду того, что данный метод генерирует только общий ландшафт. Также явным минусом является невозможность генерации резких перепадов высот. Пример такой карты показан ниже на рис. 6.

4. Разбиение карты на сектора случайной неправильной формы для полной генерации карты высот и дальнейшего ее сглаживания.

Данный метод, так же, как и предыдущий, подразумевает изначальное разбиение игрового уровня на сектора. Однако в данном случае эти сектора разбиваются случайным образом на случайные формы. Это позволяет добиться большей хаотичности в методе, а также более резких перепадов и странных форм.

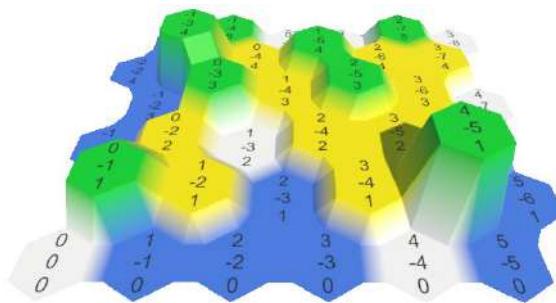


Рис. 6 – Пример сгенерированного уровня с разбиением карты на сектора правильной формы

В отличии от такого же метода с использованием секторов правильной формы, данный метод позволяет полностью сгенерировать уникальный игровой уровень с необычным и местами резким ландшафтом. Такой подход отлично проявляет себя при генерации гористой местности, а также формирования естественной береговой линии.

На рис. 7 можно наглядно увидеть, что подразумевает собой разбиение на случайные сектора.

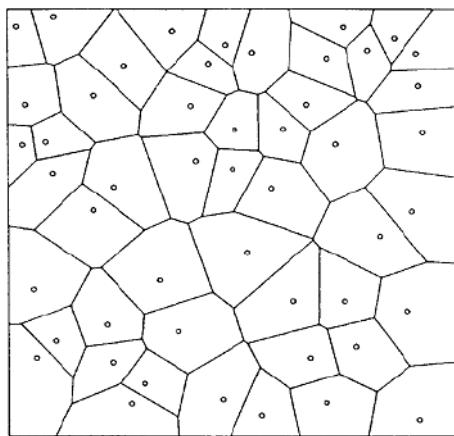


Рис. 7 – Разбиение уровня на сектора случайной неправильной формы

К плюсам данного метода можно отнести более хаотичное разбиение секторов, ведь все сектора получаются неправильных форм, что позволяет добиться уникального построения всего игрового уровня.

Главным минусом этого способа процедурной генерации является необходимость дальнейшей работы с созданным ландшафтом, поэтому больше всего этот метод подходит для генерации двумерных уровней, или карт местности.

5. Генерация матрицы высот для дальнейшего построения ландшафта.

Данный метод, в первую очередь, подразумевает создание реалистичного ландшафта для игрового уровня. Весь игровой уровень делится на большое количество маленьких квадратных

секторов, к каждому из которых в дальнейшем привязывается одна ячейка из массива карты высот.

После разбиения программа генерирует случайную матрицу высот с заданным шагом, что позволяет избежать резких перепадов между соседними секторами. За счет большого количества секторов достигается высокая плавность созданного ландшафта. На рис. 8 можно увидеть наглядное использование матрицы высот.

Такой подход позволяет добиться куда большей вариативности, чем большая часть из описанных ранее, однако так же требует дальнейшей доработки, ввиду генерации только ландшафта игрового уровня.

К плюсам данного метода можно отнести простоту в исполнении, а также большую вариативность и гладкость генерируемого уровня.

0	1	2	3	4
1	1 1 1 2 2			
2	1 1 2 2 2			
3	0 1 2 2 1			
4	0 1 1 1 1			
5	0 0 0 0 0			

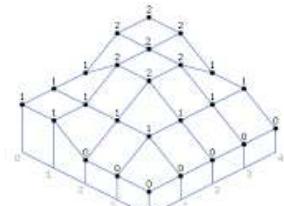


Рис. 8 – Матрица высот и ее трехмерное изображение

Неоспоримым минусом является необходимость дальнейшей доработки уровня.

Пример работы данного алгоритма можно увидеть ниже, на рис. 9.



Рис. 9 – Пример работы алгоритма с использованием матрицы высот

Обсуждение результатов

Результатом работы каждого из представленных алгоритмов является сгенерированный игровой уровень. Примеры таких уровней можно увидеть на рисунках 4, 6, 9.

После проверки работы каждого из вышеперечисленных алгоритмов процедурной генерации, было определено, что для полноценной генерации трехмерного играбельного уровня лучше

всего использовать метод разделения уровня на сектора и ручной подготовки вариантов каждого из этих секторов.

Данный метод позволяет добиться относительно высокого показателя случайности, позволяя при этом генерировать сложные природные структуры, такие как пещеры или гроты.

Отдельным плюсом такого метода можно назвать возможность создания нескольких условий на разных шагах генерации, что позволяет еще больше повысить показатель случайности и сделать генерацию уровня еще более непредсказуемой для конечного пользователя. Несмотря на необходимость прямого участия разработчика в подготовке стартового набора секторов, этот метод предлагает наибольшую вариацию конечного продукта, а потому на данный момент является фаворитом.

Выводы

Алгоритмы процедурной генерации – это очень вариативный инструмент, который может быть очень полезным в самых разных ситуациях, а особенно при разработке компьютерных игр.

В работе выполнен обзор алгоритмов процедурной генерации, которые могут быть использованы для создания трехмерного игрового уровня. Программные реализации сгенерированных игровых уровней, использующие рассмотренные алгоритмы, позволили выявить их преимущества и недостатки

Был выбран алгоритм процедурной генерации трехмерного игрового уровня – алгоритм разделения уровня на сектора, который позволяет добиться относительно высокого показателя случайности, позволяя при этом генерировать сложные природные структуры, такие как пещеры или гроты с минимальным участием разработчика в конечный процесс формирования ландшафта.

Использование данного алгоритма планируется в первую очередь для разнообразия игрового процесса и создания большего элемента случайности.

Список литературы

1. BoardGameGeek | Gaming Unplugged Since 2000. – URL: <https://boardgamegeek.com/17.10.2019>. – Заглавие с экрана.
2. Википедия – свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Borderlands#Генерация_экипировки 17.10.2019. – Заглавие с экрана.
3. Browne, C. Evolutionary Game Design / C. Browne – Berlin: Springer, 2011. – 122 p. – doi: 10.1109/TCIAIG.2010.2041928.
4. Hom, V. Automatic Design of Balanced Board Games / V. Hom, J. Marks // Proceedings of the Third Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference. – 2007. – P. 25-30.
5. Togelius, J. An Experiment in Automatic Game Design / J. Togelius, J. Schmidhuber // IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games. – 2008. – P. 111-118.
6. Cook, M. Multi-Faceted Evolution Of Simple Arcade Games / M. Cook, S. Colton // IEEE Conference on Computational Intelligence and Games. – 2011. – P. 289-296. – doi: 10.1109/CIG.2011.6032019.
7. Kodola, G.N. About procedural generation of the content and its use at the creation of computer games / G.N. Kodola, O.R. Denysiuk, M.A. Khrebet // Komp'üterne modeliuvannâ: analiz, upravlinnâ, optimizaciâ [Computer modeling: analysis, control, optimization]. – Dnipro: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2018. – № 1 (3). – P. 12-17.
8. Shaker, N. Procedural Content Generation in Games / N. Shaker, J. Togelius, J. Nelson Mark – Springer, 2016. – 218 p. – doi: 10.1007/978-3-319-42716-4.
9. David, S. Texturing and Modeling: A Procedural Approach, Third Edition / David S. Ebert, F. Kenton Musgrave, D. Peachey and etc. – Morgan Kaufmann, 2002. – 688 p.
10. Ashlock, D. Search-Based Procedural Generation of Maze-Like Levels / D. Ashlock // IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games. – 2011. – Vol. 3, No. 3. – P. 260-273. – doi: 10.1109/TCIAIG.2011.2138707.
11. Yannakakis, G. N. Experience-Driven Procedural Content Generation / G. N. Yannakakis // IEEE Transactions on Affective Computing. – 2011. – Vol. 2, No 3. – P. 147–161. – doi: 10.1109/T-AFFC.2011.6.

References (transliterated)

1. BoardGameGeek | Gaming Unplugged Since 2000. – Available at: <https://boardgamegeek.com/>
2. Википедия – свободная энциклопедия. [Wikipedia is a free encyclopedia]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Borderlands#Генерация_экипировки 17.10.2019.
3. Browne, C. Evolutionary Game Design Berlin: Springer, 2011, 122, doi: 10.1109/TCIAIG.2010.2041928.
4. Hom, V., Marks, J. Automatic Design of Balanced Board Games. *Proceedings of the Third Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference*, 2007, 25-30.
5. Togelius, J., Schmidhuber, J. An Experiment in Automatic Game Design. *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, 2008, 111-118.
6. Cook, M., Colton, S. Multi-Faceted Evolution Of Simple Arcade Games *IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, 2011, 289-296, doi: 10.1109/CIG.2011.6032019.
7. Kodola, G. N., Denysiuk, O. R., Khrebet, M. A. About procedural generation of the content and its use at the creation of computer games. *Komp'üterne modeliuvannâ: analiz, upravlinnâ, optimizaciâ* [Computer modeling: analysis, control, optimization]. Dnipro: Ukrainian State University of Chemical Technology Publ., 2018, 1(3), 12-17.
8. Shaker, N., Togelius, J., Nelson, Mark J. Procedural Content Generation in Games. Springer, 2016, 218, doi: 10.1007/978-3-319-42716-4.
9. Ebert, David S., Kenton, Musgrave, F., Peachey, D. and et al. Texturing and Modeling: A Procedural Approach, Third Edition. Morgan Kaufmann, 2002, 688.
10. Ashlock, D. Search-Based Procedural Generation of Maze-Like Levels. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2011, 3 (3), 260-273, doi: 10.1109/TCIAIG.2011.2138707.

11. Yannakakis, G. N. Experience-Driven Procedural Content Generation *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2011, 2(3), 147–161, doi: 10.1109/T-AFFC.2011.6.

Сведения об авторах (About authors)

Хребет Михаил Александрович – Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», студент кафедры Информационных систем; г. Днепр, Украина; e-mail: khrebet.michael@gmail.com.

Michael Khrebet – Ukrainian State Chemical-Technological University, Student at the Department of Information Systems, Dnipro, Ukraine; e-mail: khrebet.michael@gmail.com.

Кодола Галина Николаевна – Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», преподаватель кафедры Информационных систем; г. Днепр, Украина; ORCID: 0000-0001-9403-1462; e-mail: galina_kodola@udhtu.edu.ua.

Galyna Kodola – Ukrainian State Chemical-Technological University, Lecturer at the Department of Information Systems, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9403-1462; e-mail: galina_kodola@udhtu.edu.ua.

Сербулова Инна Валерьевна – Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», старший преподаватель кафедры Информационных систем; г. Днепр, Украина; e-mail: innasrb20@gmail.com.

Inna Serbulova – Ukrainian State Chemical-Technological University, Senior Lecturer at the Department of Information Systems, Dnipro, Ukraine; e-mail: innasrb20@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хребет, М. А. О процедурной генерации трехмерных виртуальных пространств / М. А. Хребет, Г. Н. Кодола, И. В. Сербулова // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 54-60. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.08.

Please cite this article as:

Khrebet, M., Kodola, G., Serbulova, I. About three-dimensional procedure virtual spaces. *Bulletin of NTU "KhPI." Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 54-60, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.08.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хребет, М. А. Про процедурну генерацію трьохвимірних віртуальних просторів / М. А. Хребет, Г. М. Кодола, І. В. Сербулова // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 54-60. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.08.

АННОТАЦІЯ У сучасних реаліях процедурна генерація контенту є одним з найбільш затребуваних і перспективних напрямків у середовищі розробки ігор. У наш час якісно виконаний та добре продуманий алгоритм процедурної генерації може взяти на себе більшу частину роботи зі створення унікального контенту під час розробки гри, або ж під час самого ігрового процесу. За допомогою процедурної генерації можна у найкоротші терміни створити набір унікальних об'єктів. Існує велика різноманітність усіляких алгоритмів процедурної генерації, кожен з яких має свої плюси і мінуси, й краще за все підходить до певного типу завдань. У даній статті розглянуто алгоритми, які можуть бути використані для створення тривимірного ігрового рівня, що дозволяє значно скоротити час на роботу зі створення таких рівнів, а також дозволить підвищити унікальність кожного згенерованого рівня. Як приклад, для ознайомлення в тексті статті викладено п'ять існуючих алгоритмів процедурної генерації, які так чи інакше дозволяють згенерувати тривимірний ігровий рівень. Кінцевою метою є знаходження оптимального алгоритму процедурної генерації, який буде задовільняти головному критерію відбору – створення повноцінного ігрового рівня з ландшафтом і об'єктами, який не потребує подальшого доопрацювання. На даний момент існує не так багато ігор, які успішно використовують алгоритми процедурної генерації при створенні повноцінного тривимірного ігрового світу – до найбільш відомим можна віднести Minecraft, No Man's Sky i Deep Rock Galactic. Підсумковим результатом дослідження стало знаходження найбільш прийнятного алгоритму процедурної генерації, за допомогою якого можна в реальному часі генерувати унікальні ігрові рівні. В якості основної вимоги до алгоритму виступала відсутність необхідності подальшої роботи зі створеним рівнем, тому що використання даного алгоритму планується у першу чергу для різноманітності ігрового процесу та створення більшого елемента випадковості. У результаті фаворитом виявився алгоритм поділу рівня на сектора, зважаючи на виконання ним основної умови, а також можливості програмування декількох умов.

Ключові слова: процедурна генерація контенту; алгоритм; рівень гри; тривимірна генерація; комп'ютерна гра; ігровий ландшафт

Поступила (received) 29.09.2019

PTEROSTILBENE ENRICHMENT OF DRY CONVENIENCE FOOD FOR INSTANT MUFFINS*

A. KOGAN, Y. POLYVANOV*, I. HONCHARENKO, E. SUPRUNENKO

Department of Food Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, UKRAINE
e-mail: mr.egor.pv@gmail.com

ABSTRACT Modern society is overloaded with uncontrolled flows of information, emotions and stress. On top of that, despite promoting a healthy diet, the populations of many countries are overweight, obese, and having type 2 diabetes. The role of genes in the development of diabetes, obesity and senile dementia is not so great. Vast majority of people obtain eating habits that appear to be significant factors in the onset of syndromes of demetia. Flour confectionery products, which include muffins, have gained popularity in many countries in the world, according to this, the development of technologies related to the enrichment of classical formulations with useful substances or components has relevance and necessity. This is also due to the expansion of the market for flour confectionery products that meet the strategy of a balanced and healthy diet. The aim of the article is to develop recipes and technology for instant muffins from dry semi-processed goods with the addition of dry blueberry powder as a source of pterostilbene, a substance that reduces the risk of early aging, Alzheimer's disease, type 2 diabetes, the effects of stress and depression. The proposed technology ensures the preservation of the beneficial effect of the biologically active substance that undergone heat treatment, due to the afore proposed short-term effect of the prepared mixture when exposed to microwaves. Developed dry mixes for muffins can be recommended for everyone, because they do not contain fat and sugar. Sweetness to the finished product is provided with the extract from stevia leaves. Muffins do not contain chemical disintegrants.

Key words: flour products; muffin; pterostilbene; blueberry powder; dementia; early aging; type 2 diabetes

ЗБАГАЧЕННЯ ПТЕРОСТИЛЬБЕНОМ СУХОГО НАПІВФАБРИКАТУ ДЛЯ МАФІНІВ ШВИДКОГО ПРИГОТОВУВАННЯ*

A. B. КОГАН, Є. А. ПОЛИВАНОВ, І. П. ГОНЧАРЕНКО², К. Є СУПРУНЕНКО²

кафедра харчових технологій Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, УКРАЇНА

АННОТАЦІЯ Сучасне суспільство перевантажене неконтрольованими потоками інформації, емоціями, стресами. На додаток до всього, незважаючи на пропаганду здорового харчування, населення багатьох країн страждає надмірною вагою, ожирінням і діабетом 2 типу. Роль генів в розвитку діабету, ожиріння і старечого недоумства не так вже є відчутна. У переважної більшості людей, значними факторами виникнення синдромів деменції є харчові звички. Борошняні кондитерські вироби, до яких належать мафіни, завоювали популярність у багатьох країнах світу, отже розробка технологій, пов'язаних із збагаченням класичних рецептур корисними речовинами або компонентами, має актуальність і необхідність. Це також пов'язано з розширенням ринку борошняних кондитерських виробів, що відповідають стратегії збалансованого і оздоровчого харчування. Метою статті є розробка рецептур і технологій мафінів швидкого приготування з сухого напівфабрикату з додаванням сухого порошку лохини, як джерела птеростільбену - речовини, що дозволяє знизити ризик передчасного старіння, хвороби Альцгеймера, діабету 2 типу, наслідки стресу і депресії. Запропонована технологія забезпечує збереження корисної дії біологічно активної речовини після термічної обробки, оскільки запропоновано короткочасний вплив підготовленої суміші в полі надвисоких частот. Розроблені сухі суміші для мафінів можуть бути рекомендовані для широких верств населення, оскільки не містять жиру і цукру. Солодкість готовому виробу додає екстракт з листя стевії. У складі мафінів не міститься хімічних розпушувачів.

Ключові слова: борошняні вироби; мафін; птеростільбен; порошок лохини; деменція; раннє старіння; діабет 2 типу

Introduction

Most people prefer flour confectionery products for their taste and the feeling of pleasure from eating them. Various types of sugars, fats and complex carbohydrates provide early satiety with one portion of a small volume product. The tasteful harmony of products

depends not only on fats and sugars, but also on flavorings and flavoring agents (raisins, nuts, chocolate crisps, coconut flakes, fruit fillings, pralines, etc.).

The presence of such components in flour confectionery products guarantees producers stable conditioned reflexes, taste addiction and a conscious desire of consumers to make a purchase.

* Scientific adviser - Head of the Department of Food Technologies, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kondratjuk Nataliia

As you can see, such an addiction arises at the psychological level, i.e. engages the brain. We should not forget about the dangers of an excess of fats and free sugars in the human diet. Therefore, the right balance between taste and benefit for the body is one of the main strategies for the development of the food industry. Proper nutrition is a fundamental factor in a healthy lifestyle. With a constant correlation of these two concepts, the problem of 21st century is clearly indicated: in the absence of one, the meaning of the other is lost.

The question of the relationship between nutrition and human activity has previously been raised by scientists. To maintain a high level of activity, prophylactic diets were proposed, enrichment of traditional products and rations with components containing biologically active additives, physical education and sports. However, all this was effective only at the time of implementation. With the cessation of physical activity and the use of dietary supplements, disturbances of the body quickly began to accumulate.

It is indisputable fact that poor, unbalanced nutrition leads to a permanent change in DNA [1], depression, chronic headaches and cognitive impairment.

Therefore, the second approach to regulate physical activity (in our opinion) should be to enrich foods and diets with almost no change in taste habits.

Ukraine's food and processing industry's development strategy in the field of confectionery products for the period up to 2020 provides for the enhancement of product quality and competitiveness. Flour confectionery products, including muffins, are the largest sales segment in the Ukrainian confectionery market. They are in high demand in our country's population and are very popular abroad. Mainly domestic ingredients are used in the production of flour confectionery products. That allows you to stay for a long time in the segment of products for the population with low purchasing power.

However, this does not at all make this type of product uninteresting for the solvent population. A variety of tastes, fillings, commodity forms, packaging design, creates all kinds of trajectories for the distribution of flour confectionery among different segments of the population. This is followed by the technical component: the use of resource-saving technologies, new processing methods and innovative concepts of classic products.

It is equally important to expand the assortment to positions that meet the goals and objectives of a balanced and adequate diet to ensure the competitiveness of flour confectionery on the world market. Previously, we developed a dry mix technology to make muffins without sugar and fat. The final stage of product preparation was pouring with water, brew for 5-7 minutes and minute processing in an ultra-high frequency electromagnetic field.

The products have gained popularity among IT employees, financiers, office workers and students, that is, people engaged in mental work. This is precisely what served as an incentive for the development of

flour confectionery products (muffins) technologies, with increased content of biologically active substances that regulate brain activity.

Thereby, enrichment of food products, which is in large demand, with substances that restore brain disorders and provide brain activity for a long time, is not just a preventative measure, but a solution to a number of global problems of society.

These conclusions are the result of an analytical study of statistical data, which suggests that in 2018, 50 million people were recorded with the cases of dementia. If timely measures are not taken, then literally in 30 years there will be three times as many people with the cases of dementia [2]. Disappointing prognosis for type 2 diabetes. An increase in the number of patients by 2030 from 420 to 600 million people [3]. Crohn's disease is also considered progressive (2-4 people per 100,000 inhabitants per year) [4].

The aim of the study

The aim of the work is the expediency of using blueberry powder in the production technology of instant muffins, which allows to expand the range of dishes from semi-finished products of high degree of preparedness, to improve the nutritional value of flour confectionery in prophylaxis purposes.

Statement of the main material

The insufficient amount of time that a person can spend to a meal is associated with an overall increase in daily activity, lifestyle, which defines the preferred nutrition of high readiness semi-finished products or an increase in snacks. Therefore, in this paper, we consider the development of dry muffins with the addition of dry blueberry powder which contains: pterostilbene and resveratrol, which are derivatives of trans-stilbene. Pterostilbene and resveratrol have a beneficial effect on the cardiovascular system, central nervous system. They have antioxidant, anti-inflammatory properties and inhibit the growth of cancer. In addition, they lower insulin resistance, glucose and cholesterol levels.

The presence of one hydroxyl group in the structure of pterostilbene allows it to easily pass through the blood-brain barrier, which, in addition, is a diffusion barrier essential for the normal functioning of the central nervous system and stays in the body longer than resveratrol [5]. Its advantage, in addition, is that it has the ability to absorb free radicals and protect biomolecules from oxidative effects [6]. According to studies, the use of pterostilbene enhances the effectiveness and reduces the adverse effects of chemoradiotherapy and can enhance immunotherapy. It can be used in combination with conventional cancer treatment methods, thereby increasing their oncostatic effectiveness. Pterostilbene also activates sirtuin - a protein responsible for aging and DNA repair. Pterostilbene has a beneficial effect as anti-aging compounds, modulating signs of aging, including

oxidative damage, inflammation, telomere depletion and cell aging [7].

Resveratrol, according to studies conducted in 2010, affects the secretion and concentration of insulin in the blood. Reduces it with high-calorie diets [8].

Also, resveratrol has antagonistic effects on the development of cancer by regulating microRNAs and short non-coding RNAs [9]. The studies described in the «Journal of Agricultural and Food Chemistry» show that resveratrol has a strong antioxidant and anti-inflammatory effect. [10].

The negative effect of sugar on the human body was taken into account when developing the formulation of instant muffins. With a daily consumption of sugar-containing foods, cells are exposed to high levels of insulin and gradually reduce the amount of insulin

receptors on their surface. Therefore, stevia and fructose replaced sugar. [11-13].

The discussion of the results

The studies were conducted in the laboratory at the Department of Food Technology of the Oles Honchar Dnipro National University.

Earlier, we developed a formulation of instant muffins with the aroma of "Vanilla", which has a light color of dough. However, during preliminary experiments it was found that the addition of blueberry powder, which was originally dark in color, negatively affects the color of the crumb, so it was decided to use the berry powder in the composition of muffins with cocoa. Blueberry powder in a dosage of flour corresponding to 3, 5 and 10% by weight of flour.

Table 1 – Chocolate muffin recipe with blueberry powder

Raw materials	Raw material consumption per 100 g			
	Wheat flour	Sample № 1 3 %	Sample № 2 5 %	Sample № 3 10 %
Wheat flour	20,65	20,35	20,43	20,28
Blueberry powder	–	0,63	1,08	2,25
Stevia extract	0,66	0,67	0,68	0,72
Fructose	19,71	20,04	20,53	21,52
Egg powder	12,54	12,75	13,06	13,69
Baking powder	2,99	3,04	3,11	3,26
Cocoa alkalized	2,59	2,63	2,70	2,83
Enzyme	0,40	0,40	0,41	0,43
Vanillin	0,20	0,20	0,21	0,22
Water	47,79	48,57	49,77	52,16
<i>Total</i>	107,53	109,29	111,98	117,37
<i>Output</i>	100	100	100	100

The technology for preparing the dry mix for instant muffins includes in the following operations:

1. Sifting of dry components;
2. Dosing according to the recipe;
3. Mixing to a homogeneous composition;
4. Filling.
5. Packing.

The following method is used to prepare a chocolate muffin from a semi-finished product:

1. Add a portion of cold water (20-25 ml) to a measured quantity of dry mixture (the weight of one packing unit corresponds to one portion of the finished product);

2. Stir thoroughly for 1-2 minutes;

3. Let it brew for 7-10 minutes (for swelling of the protein-polysaccharide part and activation of enzymes);

4. Bake in the microwave for 1 minute at a power of at least 750 W.

5. Allow to cool before use for 1 minute.

Currently, there are many similar mixtures for making muffins. Muffin mixes are an ideal solution for the general population who want to supplement their diets with mouth-watering and high-quality products, the advantages of which are simplicity and speed of preparation, high organoleptic characteristics and nutritional value. The mixture that we have created can successfully complement the assortment of coffee houses, tea houses, lobby bars and fitness bars. Special equipment is not needed for the preparation of products: whipping machines or food processors, mixers, ovens, high-end stoves, convection ovens. The composition of the base mixture may vary, but the ingredients shown in table one are most often to be used.

Instant muffins containing pterostilbene can be recommended for the prevention of many diseases, however, during the development of the technology, one problem was identified: the low content of active

substance in a dose of blueberry powder, which corresponds to high organoleptic characteristics of ready-made muffins (Table 2).

Table 2 – Organoleptic characteristics of muffin with the addition of blueberry powder

Indicator	Characteristics
Appearance	Inherent to this product, without damage (kinks). With an increase in the dose of blueberry powder on the surface, the number of cracks and tears increases.
Color	Changes in the process of replacing part of the flour with blueberry powder from light brown to dark brown
Taste and smell	Blueberry powder is evenly distributed in the products. With an increase in blueberry powder, the bakeability of the products will slightly decrease, the acid taste will increase, a berry aftertaste and smell will appear
Appearance of fracture	Inherent to the product

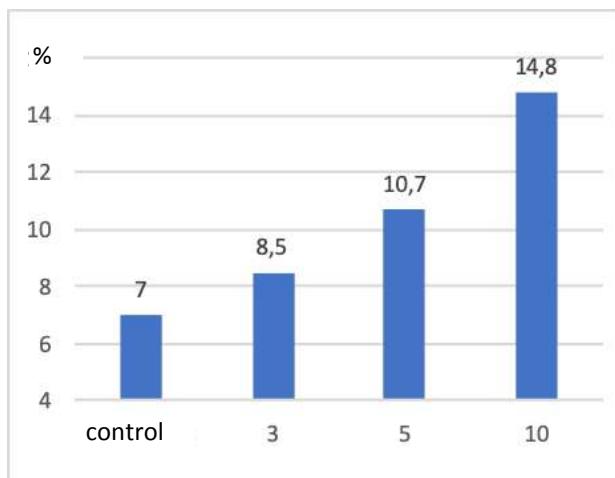


Fig. 1 – Shift in humidity of products depending on the amount of blueberry powder

Fig. 1 shows the results of measuring the moisture content of finished products. With an increase in the dosage of blueberry powder and, consequently, with an increase in organic acids, a decrease in alkalinity was noted. (fig. 2).

Fig. 1 shows that with an increase in berry powder, the moisture of the muffins increases. This is primarily due to the fact that some of the biopolymers (proteins and starchy substances of flour), which have a high water-holding ability, are reduced. The hydrocolloids of blueberry powder are mainly represented by pectin substances, but when taking into account the degree of grinding of the powder to a state of fine dispersion, pectins are present in the form of dilapidated fractions with reduced hydrophilic properties.

Fig. 1 and fig. 2 also show that the humidity and alkalinity values are within the normalized range, however, the organoleptic characteristics of the samples with blueberry powder content indicate that 10% is the maximum allowable addition of the additional component.

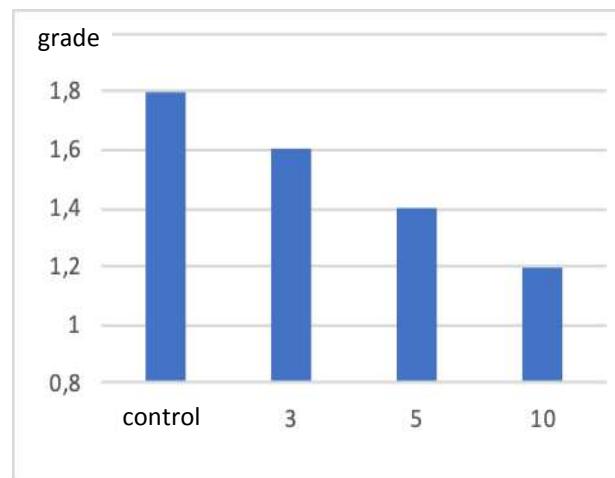


Fig. 2 – Shift in alkalinity of products depending on the amount of blueberry powder.

In this regard, pterostilbene content was measured in the finished product, which was 1 μg in 1 portion of the finished muffin. This amount corresponds to only 0.003% of the recommended norm of 0.5 - 1.0%. Of the prophylactic for a number of diseases associated with brain disorders.

Such values are negligible, so we decided to completely replace the cocoa powder with a domestic analogue - crushed flakes made from seeds of dark grapes. This solution allowed us to improve organoleptic characteristics, since the color of the curtain powder is lighter than cocoa. A harmonious dark coloring of the finished product occurred in combination with dark-colored blueberry powder. The cocoa flavor with the substitution turned into an aftertaste, which was enhanced by cocoa extract, as an additional source of chlorhexigenic acids (a substance that reduces weight).

Furthermore, grape seed flakes also contain substances that regulate brain activity and anti-aging processes, respectively resveratrol and hyaluronic acid.

Thus, the obtained samples had not only high organoleptic characteristics, but also a high content of

substances that support brain activity and reduce the likelihood of early aging of the organism.

Conclusions

The results of the tasting, organoleptic evaluation and physico-chemical parameters of muffins with blueberry powder and grape shrimp meal indicate that the best results are achieved by replacing 10.0% premium wheat flour with blueberry powder and completely replacing cocoa powder (about 3% by weight of the finished product) for flakes made from grape seed. The obtained samples have good organoleptic and physico-chemical characteristics.

The product concept has no analogues in Ukraine and the world and allows us to consider the developed technology as competitive in the domestic and foreign markets, intended for a wide range of people.

This development is not complete. The possibilities of introducing high-readiness pure pterostilbene and resveratrol powders into semi-finished products are currently being considered to obtain more tangible physiological effects.

Список літератури

1. Kobow, K. Deep sequencing reveals increased DNA methylation in chronic rat epilepsy / K. Kobow, A. Kaspi, K. N. Harikrishnan, K. Kiese, M. Ziemann, I. Khurana, I. Fritzsche, J. Hauke, E. Hahnen, R. Coras, A. Mühlbner, A. El-Osta, I. Blümcke // *Acta Neuropathol.* – 2013. – № 5(126). – P. 741–756. – doi: 10.1007/s00401-013-1168-8.
2. Деменція. Всесвітня організація здравоохранення. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dementia>.
3. Диабет. Всесвітня організація здравоохранення. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>.
4. Стяжкина, С. Статистика заболеваемости болезнью крона. Клинический случай течения болезни крона и ее влияние на качество жизни пациента / С. Стяжкина, С. Камалетдинова, М. Н. Махмудова, З. Гимаутдинова // ОЛИМП. – 2016. – № 12(11). – С. 80-82.
5. Kapetanovic, I. M., Pharmacokinetics, oral bioavailability, and metabolic profile of resveratrol and its dimethylether analog, pterostilbene, in rats / I. M. Kapetanovic, M. Muzzio, Z. Huang, T. N. Thompson, D. L. McCormic // *Cancer Chemother Pharmacol.* – 2011. – № 3(68). – P. 593–601. – doi: 10.1007/s00280-010-1525-4.
6. Acharya, J. D. Protective effect of Pterostilbene against free radical mediated oxidative damage / J. D. Acharya, S. S. Ghaskadbi // *BMC Complement Altern Med.* – 2013. – № 238(13). – P. 1-10. – doi: 10.1186/1472-6882-13-238.
7. Wenzhe, Yu. Pterostilbene inhibited advanced glycation end products (AGEs)-induced oxidative stress and inflammation by regulation of RAGE/MAPK/NF-κB in RAW264.7 cells / Yu. Wenzhe, Hu. Xiaoqian, Wa. Mingfu // *Journal of Functional Foods.* – 2018. – (40). – P. 272-279. – doi: 10.1016/j.jff.2017.11.003 .
8. Szkudelska, K. Resveratrol, obesity and diabetes / Szkudelska K., Szkudelski T. // *European Journal of Pharmacology.* – 2010. – (635). – P. 1-8. – doi: 10.1016/j.ejphar.2010.02.054.

9. Wang, M. Non-Coding RNAs as Molecular Targets of Resveratrol Underlying Its Anticancer Effects / M. Wang, S. Jiang, F. Yu, Li Zhou, K. Wang // *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* – 2019. – № 17(67). – P. 4709-4719. – doi: 10.1021/acs.jafc.9b01667.
10. Li, J. A comparative study of anti-aging properties and mechanism: resveratrol and caloric restriction / J. Li, C.-X. Zhang, Y.-M. Liu, K.-L. Chen, G. Chen // *Oncotarget.* – 2017. – № 39(8). – doi: 10.1863/oncotarget.20084.
11. Перлмуттер, Д. Еда и мозг. Что углеводы делают со здоровьем, мышлением и памятью / Д. Перлмуттер, К. Лоберг // *Научная литература.* Нью-Йорк. – 2013. – 460 с.
12. Polyvanov, Y. Evaluation of the relevance of the development of food modules with pterostilben and resveratrol of natural origin / Y. Polyvanov, A. Kogan // *Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Perfect Publishing.* Vancouver, Canada. – 2019. – 248-250.
13. Polyvanov, Y. Berry powders with a high content of pterostilbene and resveratrol in the technology of chocolate flour confectionery / Y. Polyvanov, A. Kogan // *Scientific discoveries: projects, strategies and development: Collection of scientific papers «ЛОГОС» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Edinburgh.* – 2019. – (1). – 68-70.

References(transliterated)

1. Kobow, K., Kaspi, A., Harikrishnan, K. N., Kiese, K., Ziemann, M., Khurana, I., Fritzsche, I., Hauke, J., Hahnen, E., Coras, R., Mühlbner, A., El-Osta, A., Blümcke I. Deep sequencing reveals increased DNA methylation in chronic rat. *Acta Neuropathol.*, 2013, **5(126)**, 741–756, doi: 10.1007/s00401-013-1168-8.
2. Dementsiya. Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya. Available at: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dementia>.
3. Diabet. Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya. Available at: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>.
4. Styazhkina, S., Kamaletdinova, S., Makhmudova, M. N., Gimautdinova, Z. Statistika zabolevayemosti boleznyu krons. Klinicheskiy sluchay techeniya bolezni krons i yeve vliyanije na kachestvo zhizni patsienta. *OLIMP*, 2016, **12(11)**, 80-82.
5. Kapetanovic, I. M., Muzzio, M., Huang, Z., Thompson, T. N., McCormic, D. L. Pharmacokinetics, oral bioavailability, and metabolic profile of resveratrol and its dimethylether analog, pterostilbene, in rats. *Cancer Chemother Pharmacol.* 2011, **3(68)**, 593–601, doi: 10.1007/s00280-010-1525-4.
6. Acharya, J. D., Ghaskadbi, S. S. Protective effect of Pterostilbene against free radical mediated oxidative damage. *BMC Complement Altern Med.* 2013, **238(13)**, 1-10, doi: 10.1186/1472-6882-13-238.
7. Wenzhe, Yu., Xiaoqian, Hu., Mingfu, Wa. Pterostilbene inhibited advanced glycation end products (AGEs)-induced oxidative stress and inflammation by regulation of RAGE/MAPK/NF-κB in RAW264.7 cells. *Journal of Functional Foods*, 2018, **(40)**, 272-279, doi: 10.1016/j.jff.2017.11.003 .
8. Szkudelska, K., Szkudelski, T. Resveratrol, obesity and diabetes. *European Journal of Pharmacology*, 2010, **(635)**, 1-8, doi: 10.1016/j.ejphar.2010.02.054.

9. Wang, M., Jiang, S., Yu, F., Zhou, L., Wang, K. Non-Coding RNAs as Molecular Targets of Resveratrol Underlying Its Anticancer Effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, **17**(67), 4709-4719, doi: 10.1021/acs.jafc.9b01667.
10. Li, J., Zhang, C.-X., Liu, Y.-M., Chen, K.-L., Chen, G. A comparative study of anti-aging properties and mechanism: resveratrol and caloric restriction. *Oncotarget*, 2017, **39**(8), doi: 10.18632/oncotarget.20084.
11. Perlmutter, D., Loberg, K. Yeda i mozg. Chto uglevody delayut so zdorov'ym, myshleniyem i pamyat'yu: *Nauchnaya literatura*. New-York, 2013, 460.
12. Polyvanov Y., Kogan A. Evaluation of the relevance of the development of food modules with pterostilben and resveratrol of natural origin. *Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Perfect Publishing*. Vancouver, Canada, 2019, 248-250.
13. Polyvanov, Y., Kogan, A. Berry powders with a high content of pterostilbene and resveratrol in the technology of chocolate flour confectionery. *Scientific discoveries: projects, strategies and development: Collection of scientific papers «ЛОГОС» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Edinburgh*, 2019, (1), 68-70.

Сведения об авторах (About authors)

Alisa Kogan – student, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5863-8686; e-mail: alisakogan2000@gmail.com.

Коган Аліса Борисівна – студентка, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-5863-8686; e-mail: alisakogan2000@gmail.com.

Yehor Polyvanov – student, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4999-5187; e-mail: mr.egor.pv@gmail.com.

Поливанов Єгор Андрійович – студент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-4999-5187; e-mail: mr.egor.pv@gmail.com.

Iryna Honcharenko – Assistant of the department: Food Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9349-254X; e-mail: goncharenkoira88@ukr.net

Гончаренко Ірина Петрівна – асистент кафедри харчових технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0001-9349-254X; e-mail: goncharenkoira88@ukr.net

Katerina Suprunenko - Assistant of the department: Food Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8741-5449; e-mail: suprunenko.katerina90@gmail.com.

Супруненко Катерина Євгенівна - асистент кафедри харчових технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-8741-5449; e-mail: suprunenko.katerina90@gmail.com.

Please cite this article as:

Kogan, A., Polyvanov, Y., Honcharenko, I., Suprunenko, E. Pterostilbene enrichment of dry convenience food for instant muffins. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 61–66, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.09.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Коган, А. Б. Збагачення птеростильбеном сухого напівфабрикату для мафінів швидкого приготування / А. Б. Коган, Е. А. Поливанов, І. П. Гончаренко, К. Є. Супруненко // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 61–66. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.09.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Коган, А. Б. Обогащение птеростильбеном сухого полуфабриката для маффинов быстрого приготовления / А. Б. Коган, Е. А. Поливанов, И. П. Гончаренко, Е. Е. Супруненко // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 61–66. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.09.

АННОТАЦИЯ: Современное общество перегружено неконтролируемыми потоками информации, эмоциями, стрессами. В дополнение ко всему, несмотря на пропаганду здорового питания, население многих стран страдает избыточным весом, ожирением и диабетом 2 типа. Роль генов в развитии диабета, ожирения и старческого слабоумия не так уже и велика. У подавляющего большинства людей, значительными факторами возникновения синдромов являются пищевые привычки. Мучные кондитерские изделия, к которым относятся маффины, завоевали популярность во многих странах мира, следовательно разработка технологий, связанных с обогащением классических рецептур полезными веществами или компонентами, имеет актуальность и необходимость. Это также связано с расширением рынка мучных кондитерских изделий, отвечающих стратегии сбалансированного и оздоровительного питания. Целью статьи является разработка рецептур и технологии маффинов быстрого приготовления из сухого полуфабриката с добавлением сухого порошка голубики, как источника птеростильбена - вещества, что позволяет снизить риск преждевременного старения, болезни Альцгеймера, диабета 2 типа, последствия стресса и депрессии. Предложенная технология обеспечивает сохранение полезного действия биологически активного вещества после термической обработки, поскольку предложено кратковременное воздействие подготовленной смеси в поле сверхвысоких частот. Разработанные сухие смеси для маффинов могут быть рекомендованы для широких слоев населения, поскольку не содержат жира и сахара. Сладость готовому изделию придает экстракт из листьев стевии. В составе маффинов не содержится химических разрыхлителей.

Ключевые слова: мучные изделия; маффин; птеростильбен; порошок голубики; деменция; раннее старение; диабет 2 типа

Надійшла (received) 01.10.2019

ОБ ЕКОЛОГІИ ВОКРУГ ПРОМЫШЛЕННИХ РАЙОНОВ г. МАРИУПОЛЯ

Ф. И. ЛУХТУРА

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА
e-mail: lukhelena@yandex.ru

АННОТАЦІЯ Содержание кислорода в атмосферном воздухе городов, а также в жилых, офисных и производственных помещениях является важнейшим фактором самочувствия и здоровья горожан. При высокой температуре и высокой абсолютной влажности приземного воздуха, содержание кислорода в атмосферном воздухе минимально, и люди могут испытывать признаки гипоксии. В промышленных южных городах, к которым относится г.Мариуполь (Украина), существуют дополнительные факторы, затрудняющие дыхание человека: более высокая (относительно окружающей город территории) температура воздуха и загрязненность атмосферы, в т.ч. угарным газом и взвешенными частицами. Это приводит в условиях аномальной жары и промышленных выбросов к повышению заболеваемости и смертности городского населения. Точные измерения парциального давления и парциальной плотности кислорода требуют специального оборудования и методик, поскольку процентное содержание кислорода в атмосферном воздухе достаточно велико, а его изменения относительно малы. Большинство современных приборов, используемых городскими службами мониторинга атмосферы, ориентированы на измерение существенных отклонений содержания кислорода от нормы. Службы мониторинга состава воздуха обычно не измеряют плотность кислорода, по-видимому, из-за неявного предположения ничтожного влияния изменения метеоусловий на его содержание. Кроме того, измерение малых изменений содержания кислорода в приземном слое воздуха является достаточно сложной технической задачей. В работе представлена попытка аналитического определения распределения концентраций кислорода в приземных слоях атмосферы вокруг мест стока кислорода из атмосферы на металлургических предприятиях г. Мариуполя, приведена аналитическая модель стока кислорода из приземного слоя на основе теории «обратной струи» в одномерной постановке. Получены соответствующие изолинии концентраций на различных расстояниях от мест стока кислорода. При этом концентрация кислорода снижается обратно пропорционально расстоянию от стока, что позволяет достаточно просто оценивать распределение концентраций в приземном слое атмосферы вокруг металлургических предприятий при известных координатах мест его стока в безветренную погоду. Проанализирована пространственная изменчивость и эпизоды аномального содержания кислорода в приземном воздухе в контексте их возможного влияния на самочувствие людей.

Ключевые слова: металлургические комбинаты; атмосфера; кислород; концентрация; вредные выбросы; аномальная жара; самочувствие населения; смертность населения

ABOUT ECOLOGY AROUND INDUSTRIAL AREAS OF MARIUPOL

F. LUKHTURA

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT The oxygen content in the atmospheric air of cities, as well as in residential, office and industrial premises is the most important factor in the health and well-being of citizens. With high temperature and high absolute humidity of the surface air, the oxygen content in ambient air is minimal, and people may experience signs of hypoxia. In the industrial southern cities to which the city of Mariupol (Ukraine) belongs, there are additional factors that impede human breathing: higher (relative to the territory surrounding the city) air temperature and pollution of the atmosphere, including carbon monoxide and suspended particles. This results in conditions of abnormal heat and industrial emissions to an increase in the morbidity and mortality of the urban population. Accurate measurements of partial pressure and partial density of oxygen require special equipment and techniques, since the percentage of oxygen in ambient air is large enough, and its changes are relatively small. Most modern instruments used by urban atmospheric monitoring services are focused on measuring significant deviations of oxygen content from the norm. Air quality monitoring services do not usually measure the density of oxygen, apparently due to the implicit assumption of the negligible effect of changes in weather conditions on its content. In addition, the measurement of small changes in the oxygen content in the surface air is a rather complicated technical task. The paper presents an attempt to analytically determine the distribution of oxygen concentrations in the surface layers of the atmosphere around the places of oxygen runoff from the atmosphere at metallurgical enterprises of Mariupol, provides an analytical model based on the theory of "reverse flow" in a one-dimensional formulation of oxygen flow from the surface layer. The corresponding concentration contour lines were obtained at various distances from the oxygen sink sites. At the same time, the oxygen concentration decreases inversely with the distance from the drain, which makes it quite easy to estimate the distribution of concentrations in the surface layer of the atmosphere around the metallurgical enterprises at known coordinates of its drain points in calm weather. The spatial variability and episodes of anomalous oxygen content in the surface air are analyzed in the context of their possible effect on people's well-being.

Key words: atmosphere; metallurgical plants; oxygen; concentration; harmful emissions; abnormal heat; well-being of the population of industrial cities; population mortality

Введение

Восточная Украина это индустриальное сердце Украины, где формируется более 30 % общего ВВП

Украины. Это Донецкая, Луганская, Днепропетровская и Запорожская области. При этом на промышленных предприятиях региона в большей степени используются устаревшие технологии.

Вследствие этого здесь загрязнение окружающей среды, в т.ч. эмиссия парниковых газов, значительно превышает среднеевропейские показатели [1].

Особенно высокая степень загрязнения окружающей среды наблюдается в г. Мариуполе (Донецкая область), где проживает до 0,5 млн. человек и где находится крупнейший промышленный потенциал региона, в состав которого входят два металлургических предприятия ПАО «ММК им. Ильича» и ПАО «ММК «Азовсталь», являющимися «градообразующими». В связи с наличием этих предприятий, вредные выбросы которых в окружающую среду составляют порядка 98% от общегородских, экологическая обстановка в городе, оцениваемая комплексным индексом загрязнения атмосферы (КИЗА), достаточно сложная. За 2007-2011 годы этот индекс по данным [2] составлял очень высокое значение (при значениях КИЗА 14 и выше), а за 2012 и 2013 годы – высокое значение (при КИЗА от 8 до 13). Так в 2011 году в атмосферный воздух города было выброшено почти 382 тыс. т вредных веществ, 2012 году - более 350 тысяч тонн (для сравнения за 2016 год количество выбросов составило 256 тысяч тонн) [1]. Подробные данные по выбросам вредных веществ в окружающую среду в открытой печати за последние годы практически отсутствуют. Существуют нормы ПДК (предельно допустимых концентраций) веществ в воздухе [2], за которыми отслеживают специальные органы (лаборатория загрязнения окружающей среды) и принимают соответствующие меры: от штрафа до закрытия предприятия. Санитарно-эпидемиологическая станция (СЭС) г. Мариуполя осуществляет периодический контроль загрязнения атмосферы под факелами предприятий и на постах контроля в Ильичевском (ныне Кальмиусском) и Жовтневом (ныне Центральном) районах города. Остальные меры – штрафы, попытки закрытия предприятий – в большинстве своем скрыты от общественности.

По рейтингу уровня загрязненности среди городов Украины за 2012 год г. Мариуполь опустился с 1 на 7-ое место, за 2013 год - на 16 место, но оценивается, как высокий [2]. В [2] и на рис. 1 в соответствии с данными Центральной геофизической обсерватории г. Киева в 2014 г. представлена динамика КИЗА г. Мариуполя за период 2000-2013 гг. На диаграмме представлена динамика падения КИЗА в период с 2000 по 2005 гг. и последующий его рост, связанный с ростом производства в 2006-2009 годах.

Падение КИЗА в период с 2009 по 2012 год, когда наблюдался рост объемов производства на комбинатах связывают в [2] с принятием соответствующих мер по снижению концентраций загрязняющих веществ в атмосфере согласно [1]. В большей степени и в первую очередь это связано с полным демонтажем трех коксовых батарей №№5,7 в июне и октябре 2012 года, и №6 - в ноябре этого же года и огромного мартеновского цеха с уникальными

качающимися печами (12 печей) на комбинате «Азовсталь» по данным Пресс-центра Группы Метинвест от 25 Мая 2011 г. При этом более всего загрязнен воздух в зоне влияния металлургических комбинатов и прилегающих к МК им. Ильича жилых кварталах Ильичевского (ныне Кальмиусского) района, и части Жовтневого (Центрального) района города (Кировский жилмассив), расположенного в непосредственной близости от МК «Азовсталь».

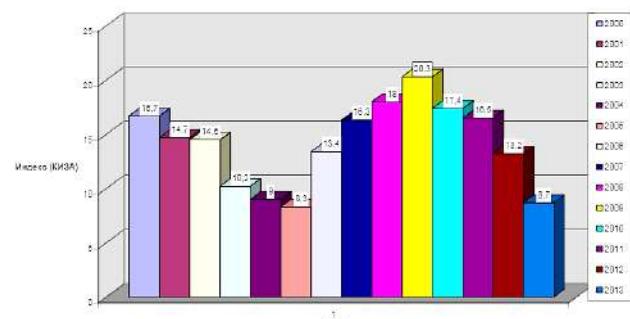


Рис. 1 - Динамика комплексного индекса загрязнения атмосферного воздуха г. Мариуполя с 2000 г. по 2013 г. [2]

Тем не менее, и как было указано выше, металлургическая отрасль города находится на ведущем месте среди всех других отраслей промышленности в городе по выбросам в атмосферу. Главной причиной экологических проблем, возникающих в результате деятельности металлургических гигантов, является именно загрязнение атмосферы (рис. 2 и рис. 3). Выбросы из труб приводят к загрязнениям атмосферы, воды и почвы отходами производств, уничтожению растительности и образованию техногенных зон вокруг предприятий. К тому же, экологические проблемы обостряются в отечественной металлургии из-за устаревших технологий и износа оборудования. До 70% всех мощностей в отечественной металлургии, по некоторым данным, являются устаревшими, изношенными и убыточными.

Анализ экологической ситуации в г. Мариуполе свидетельствует, что работа металлургических предприятий в области природоохранных мероприятий недостаточно компенсируют выбросы вредных веществ в окружающую среду и необходимо продолжить работы по снижению техногенной нагрузки и модернизации оборудования.

Эффект снижения уровня загрязнения воздуха связан, к сожалению, в большей степени со снижением производства в кризисный период и демонтажем основного оборудования комбинатов. Таким образом, выбросы в последние годы сократились в основном не за счёт целенаправленной деятельности по борьбе с ними, а за счёт общей деиндустриализации металлургических комбинатов, т.е. предприятиями используется в основном

экстенсивный, а не интенсивный подход к решению экологических проблем. Несмотря на это они по-прежнему больше всех загрязняют окружающую среду. Кроме того, часто встречающийся в современных условиях непрофессионализм управленческого персонала меткомбинатов в производственных вопросах в некоторых случаях также может привести к повышению (или иногда к снижению) вредных выбросов.



Рис. 2 – Атмосфера на МК «им.Ильича» в моменты выбросов



Рис. 3 – МК «Азовсталь» загрязняет воздух, воду (шлаковыми отвалами) и почву

В контексте вышесказанного и вне зависимости от объемов промышленного производства должно обеспечиваться высокое качество очистки вредных выбросов согласно установленным нормам и инструкциям.

Нельзя сказать, что в экологию города металлурги ничего не вкладывают. По данным статистики [1], инвестиции металлургических предприятий в охрану окружающей среды достаточно весомые. Однако вложенные инвестиции не могут решить всех проблем. К тому же в общем объеме экологических инвестиций доля металлургической промышленности постепенно падает. И хотя промышленные предприятия и декларируют, что на природоохраные цели выделяются большие суммы, крайне редко общественности удается узнать, куда именно идут эти деньги. В отношениях же с промышленными гигантами государство проявляет принципиальность пока только в налоговых вопросах.

Наконец, загрязнение атмосферы в Мариуполе является существенным недостатком для развития экономики города, осложняющим поиск новых инвесторов, а с усугубляющимся экономическим фактором – низкой заработной платой основного (рабочего) персонала, и попытки удержать на предприятиях и в городе квалифицированную рабочую силу. Высокий уровень загрязнения окружающей среды препятствует также развитию в регионе туризма [2].

Кроме вышесказанного, население города ощущает также недостаток кислорода (O_2) для дыхания, вызванный высокой температурой воздуха в летний период, экологическими факторами, в т.ч. в первую очередь повышенной концентрацией в городском воздухе угарного газа [7-12] и взвешенных частиц (аэрозолей), мешающих нормальному усвоению кислорода человеческим организмом. А основным фактором, определяющим самочувствие человека, является содержание O_2 , необходимого для дыхания, в окружающем воздухе. Недостаток кислорода в воздухе вызывает у человека кислородное «голодание» (гипоксию) – пониженное содержание кислорода в организме [3-6].

Черная металлургия города – один из крупнейших потребителей кислорода (технического и технологического). Его производители – блоки разделения воздуха (БР), где происходит практически сток кислорода из атмосферы (при полном возврате азота в атмосферу). Питаются БР от собственных воздушных компрессоров, от ТЭЦ, ПЭВС и др. станций. Концентрация кислорода в окружающей атмосфере в силу этих обстоятельств ниже нормы. Человек при этом полностью не осознает всю опасность такого положения. Известно [3-6] и как указано в [13], что наиболее эффективно обеспечение кислородом живых организмов, участвующего в окислительно-восстановительных процессах, происходит в тех случаях, когда объемная концентрация кислорода в воздухе, составляет не менее 20,8%. Такое содержание кислорода, к сожалению, в условиях города Мариуполя не реализуется. Реализуется лишь в удаленных городских парках (20,8%), загородных зонах (до 21,6%), в т.ч. на берегу моря (до 21,9%). В то же время, в городских районах высокого риска, в жилых и служебных помещениях содержание (концентрация) кислорода в воздухе значительно меньше (20%), что приводит к возникновению у людей гипоксии (кислородной недостаточности). Поскольку недостаток кислорода в 1,5–2,0% вызывает повышенную утомляемость, головную боль, сонливость и другие нарушения активности головного мозга [4], то естественно, что горожан преследуют эти недуги и на улице, и дома и на работе.

В этой связи и независимо от этого, в медицине [6] разработана классификация типов погоды по воздействию на самочувствие человека (табл.1). Среди критериев, определяющих самочувствие

человека, используется и концентрация кислорода. На этом основании выделяют погоду трех основных типов [6] (табл.1).

Таблица 1 - Классификация типов погоды по влиянию на самочувствие людей отклонений плотности атмосферного кислорода от среднего ($285 \text{ г}/\text{м}^3$) его значения в атмосфере Земли [6]

Типы погоды по медицинской общепринятой классификации	Абсолютные отклонения $\Delta\rho, \text{ г}/\text{м}^3$	Самочувствие людей и неблагоприятные симптомы
Благоприятная	5	Хорошее
Умеренно-неблагоприятная	5–10	Утомляемость, сонливость
Неблагоприятная	10–15 и более	Головная боль, потеря сознания

Недостаток кислорода в промышленных, герметично замкнутых объемах жилых и служебных помещениях и на открытом воздухе объясняется одинаковыми термодинамическими процессами, но по-разному протекающими.

Массовая концентрация кислорода в приземном воздухе, важная для правильного дыхания, зависит от давления, температуры и влажности воздуха и для совершенного газа и в естественных условиях описывается классическими формулами термодинамики [13].

Поскольку процентное содержание O_2 в атмосферном воздухе достаточно велико, а его изменения в приземном слое атмосферы относительно малы, точные измерения парциальных давления и плотности O_2 требуют специальных методик и дорогостоящего оборудования. Измеряется в большинстве случаев не собственно содержание O_2 в воздухе, а отношение его содержания к содержанию азота (N_2) - O_2/N_2 . При этом явно или неявно предполагается, что, на основании меньшей относительной изменчивости азота по сравнению с кислородом, содержание N_2 в атмосферном воздухе неизменно или его изменениями можно пренебречь, т.к. N_2 в воздухе почти в 4 раза больше, чем O_2 . Существуют также более оперативные методы определения отношения O_2/N_2 *in situ*, позволяющие получать информацию с большим пространственным и временным разрешением, но они обладают значительно меньшей точностью [13].

Службы мониторинга состава воздушной атмосферы обычно не проводят измерения плотности кислорода, по-видимому, из-за неявного предположения ничтожного влияния изменения метеоусловий и наличия вредных веществ в воздухе на его содержание. Измерение малых изменений концентраций кислорода в приземном воздухе, кроме того, является достаточно сложной технической задачей. Большинство современных приборов, используемых городскими службами мониторинга атмосферы, предназначены для измерения

существенных отклонений концентрации кислорода от нормы в атмосфере.

Кроме того, если некоторые промышленные вредные выбросы (пылевые частицы, конденсат различных веществ и др.) можно заметить визуально, например, как показано на рис.1,2, то вредные газообразные компоненты и изменение состава газовой атмосферы в приземном слое визуально заметить практически невозможно. К тому же, в [1,2] в приведенных данных периодического контроля загрязнения атмосферы санитарно-эпидемиологической станцией (СЭС) г. Мариуполя отсутствуют данные по содержанию кислорода в приземном слое атмосферы, играющего колossalную роль в самочувствии населения города, на постах контроля в Ильичевском и Жовтневом районах (ныне Кальмиусском и Центральном) и в подфакельных исследованиях качества атмосферного воздуха в зоне влияния металлургических комбинатов.

Цель работы

Аналитическое определение распределения концентрации O_2 в приземном слое атмосферы на территории металлургических предприятий г. Мариуполя и в их окрестности в связи с большими расходами кислорода на нужды металлургических комбинатов. В этой связи ставится задача аналитически рассчитать распределения концентраций кислорода в приземном слое вокруг промплощадок основных его стоков из окружающего воздуха на металлургических комбинатах (ТЭЦ-ПВС, ПЭВС, компрессорные станции блока разделения кислородного цеха и др. цехов металлургических предприятий + БР, и др.) на основе метода (теории) «обратной струи»,

Изложение основного материала

Ниже авторы попытались суммировать и проанализировать полученные расчетные данные о пространственной неоднородности и эпизодах аномального содержания кислорода в приземном слое воздуха в контексте их возможного влияния на самочувствие людей. Т.к. происходящие в городе процессы загрязнения способствуют более частому возникновению различных аномальных ситуаций, такое исследование актуально не только для жителей Мариуполя. В условиях сильной летней жары в городе и техногенной обстановки в зоне влияния металлургических комбинатов на ближайших территориях от промышленных предприятий в последние несколько лет оказывались, кроме жителей Мариуполя, жители и других городов Украины, например, г. Донецка, Днепропетровска (ныне Днепр), Кривого Рога и Днепродзержинска (ныне Каменское).

Содержание кислорода в атмосферном воздухе города и в различных помещениях (жилых, офисных и производственных) является ключевым фактором, как самочувствия, так и здоровья горожан. Для

качественного регулирования роли этого фактора городским СЭС необходимо развитие системы мониторинга, оценки и прогноза концентрации (или парциальной плотности) кислорода в городском воздухе, а также информирования населения об аномальных ситуациях, возникающих при недостатке кислорода, особенно в критические периоды образования в приземном слое инверсионных слоев, когда имеют место неблагоприятные метеоусловия (НМУ) для рассеивания и распространения в атмосфере поступающих в нее от предприятий вредных веществ.

Поскольку на самочувствие человека непосредственное влияние оказывает массовая концентрация кислорода, изменяющаяся как в приземном слое атмосферы вокруг промышленных предприятий, так и при изменении метеорологических условий, возникает необходимость унификации информации о качестве воздуха для дыхания. Окончательную информацию удобно давать в терминах парциальной плотности кислорода (предпочтительней в $\text{г}/\text{м}^3$), для которых уже существует медицинская классификация [6]. Необходимо уделять особое внимание случаям минимальной концентрации кислорода в воздухе, которые соответствуют высокой его температуре, низкому давлению, высокой абсолютной влажности приземного воздуха, загрязненности атмосферы угарным газом и взвешенными частицами и, самому главному в условиях промышленного производства, стоку кислорода из атмосферы для технологических нужд металургических предприятий. Присутствие этих характерных признаков затрудняет дыхание горожан, приводит к повышению заболеваемости и смертности.

Для самочувствия человека важна величина парциальной плотности кислорода в приземной атмосфере, которая определяется уравнением состояния для сухой части воздуха [13]:

$$\rho_n = C_{O_2} (P - p_{nn}) / R_e T, \quad (1)$$

где $\rho_{n O_2}$ – парциальная плотность кислорода; C_{O_2} – объемное содержание (парциальное давление) кислорода в приземном воздухе; T , P и p_{nn} – соответственно температура, давление и упругость водяного пара в приземном воздухе; R_e – газовая постоянная воздуха.

В соответствии с (1), и как указывалось выше, содержание кислорода во вдыхаемом человеком воздухе в зависимости от метеорологических условий падает при понижении давления в атмосфере и росте температуры воздуха. Поэтому его минимальных значений следует ожидать, кроме фактора влияния промышленных предприятий, и в циклональных условиях, когда давление резко понижается, например, перед грозой. У многих людей в такие периоды возникает ощущение затрудненного дыхания.

С учетом важности перечисленных факторов влияния, и в связи со сложностью определения массовой концентрации (парциальной плотности) кислорода измерительными устройствами в приземном слое атмосферы и отсутствием данных городской СЭС в [1,2] по ним, оценим возможное уменьшение содержания кислорода в воздухе в связи со стоком его из окружающей атмосферы на указанных выше промплощадках металлургических предприятий аналитически в рамках следующей модели (допущений). Пусть происходит этот сток через точечное «отверстие» конечных размеров сосредоточенным стоком массы кислорода из неподвижной окружающей воздушной атмосферы в приземном слое (в безветренную погоду). При этом это «отверстие» заменяет воздушные всасывающие линии компрессоров (турбокомпрессоров, электрокомпрессоров и др.) указанных потребителей и предполагается, что обратно в эту же область атмосферы весь азот этого всасываемого воздуха возвращается. В связи с этим можно считать, что из приземного слоя воздушной атмосферы происходит лишь сток кислорода.

Для определения пространственной изменчивости (распределения) концентрации O_2 в приземном слое атмосферы от вышеперечисленных факторов в контексте ее возможного влияния на самочувствие человека, применим метод «обратной струи» в квазидномерной постановке. Воспользуемся законом сохранения массового расхода газа [14,15], допуская, что линии постоянной скорости (изотахи) и концентрации в «обратной струе» имеют вид полуокружностей. Центром этих окружностей является центр тяжести отверстия. Живое сечение струи – боковая поверхность полушара ($F = 4\pi R^2$). В такой постановке, принимая равномерное распределение скорости по живому сечению, являющемуся поверхностью полушара, это уравнение приобретает вид:

$$m = \int_F \rho u \Delta C dF = \rho_{omg} u_{omg} \Delta C_{omg} F_{omg},$$

или учитывая равномерное распределение скорости по живому сечению F

$$\rho u \Delta C \cdot 4\pi R^2 = \rho_{omg} u_{omg} \Delta C_{omg} \cdot 4\pi R_{omg}^2,$$

где ρ – плотность газа; u – скорость газа.

$\Delta C = C - C_{atm}$ – избыточная концентрация кислорода в живом сечении сточной струи. Индекс «*ом*» отражает параметры в отверстии.

Допуская, что толщины динамического и диффузационного слоев одинаковы, т.е. числа Прандтля и Шмидта равны ($Pr = Sc$), и сточный поток несжимаем ($\rho = \text{const}$), получим

$$\Delta C = \Delta C_{omg} \cdot \frac{R_{omg}}{R} = \frac{\Delta C_{omg}}{R}, \quad (2)$$

где $\Delta C_{\text{отв}} = C_{\text{отв}} - C_{\text{атм}}$ - избыточная концентрация кислорода в живом сечении отверстия стока; $C_{\text{атм}}$ - концентрация кислорода в атмосфере в дальнем поле струи; $R_{\text{отв}}$ - радиус «отверстия»; \bar{R} - радиус сточного потока («струи») в калибрах отверстия.

В связи с совпадением толщин динамического и диффузионного слоев при этом соблюдается

$$\text{соотношение } \frac{u}{u_{\text{отв}}} = \frac{\Delta C}{\Delta C_{\text{отв}}}.$$

К такому же соотношению (2) можно прийти, используя закон сохранения импульса сточной «струи».

С учетом сжимаемости (изменения плотности) газа ($\rho \neq \text{const}$) уравнение (2) в дальнем поле «струи» принимает вид

$$\Delta C = \Delta C_{\text{отв}} \cdot \frac{R_{\text{отв}}}{R} \sqrt{\frac{\rho_{\text{отв}}}{\rho_{\infty}}} = \frac{\Delta C_{\text{отв}}}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{отв}}}{\rho_{\infty}}}. \quad (3)$$

Таким образом, с ростом расстояния от стока кислорода избыточная концентрация кислорода в подсасываемом в «отверстие» потоке уменьшается.

Парциальную плотность кислорода в приземной атмосфере (в среднем на земном шаре она составляет около 285 г/м³), определяется уравнением (1) состояния для сухой части воздуха. Согласно соотношению (3)

$$\begin{aligned} C_{O_2} &= C_{O_2 \text{ атм}} + (0 - C_{O_2 \text{ атм}}) \cdot \frac{R_{\text{отв}}}{R} \sqrt{\frac{\rho_{\text{отв}}}{\rho_{\infty}}} = \\ &= C_{O_2 \text{ атм}} \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{отв}}}{\rho_{\infty}}} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где C_{O_2} и $C_{O_2 \text{ атм}}$ – соответственно объемное содержание кислорода в приземном воздухе и в дальнем поле приземного воздуха; P , T и $p_{\text{нн}}$ – соответственно давление, температура и упругость водяного пара в приземном воздухе; R_e – газовая постоянная.

Тогда в соответствии с выражением (4) парциальная плотность кислорода в приземном слое будет

$$\rho_n = C_{O_2 \text{ атм}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{отв}}}{\rho_{\infty}}} \right) (P - p_{\text{нн}}) / R_e T. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены результаты расчета по (4) изменению концентрации кислорода в приземном слое вокруг цехов двух металлургических предприятий г. Мариуполя, где наблюдается сток кислорода (ТЭЦ-ПВС, ПЭВС, компрессорные станции блока разделения кислородного цеха (БР) и др + БР). При этом диаметр «отверстия» принят на основании существующих на предприятиях

действительных расходов кислорода и воздуха при известных допустимых скоростях движения газов во всасывающих линиях компрессоров.

На рис. 4 приведены концентрические изолинии (равной) концентрации кислорода на различных расстояниях от его стока, соответственно в системе ТЭЦ-БР на территории комбината им. Ильича – 450, 900, 1800 м, и ПЭВС на территории комбината «Азовсталь» – 450, 1000, 2250 м. При этом концентрация кислорода в дальнем поле окружающей атмосферы принята равной 21%, что является завышенной, и на территории комбинатов не наблюдается.

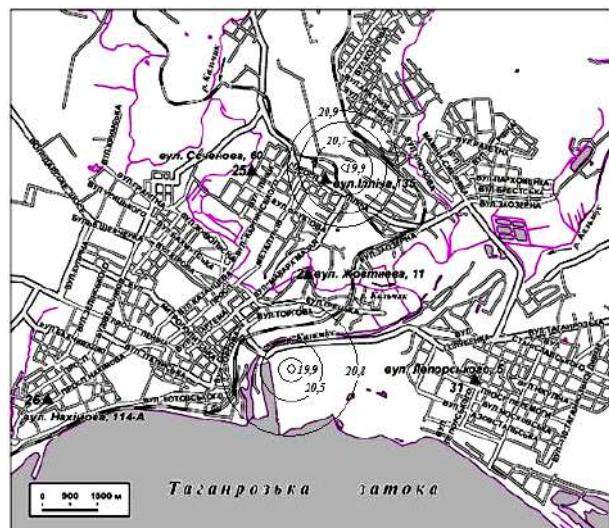


Рис. 4 - Пример распределения пространственной изменчивости содержания (концентраций) кислорода в приземном слое воздуха вокруг мест расположения его стоков на ТЭЦ-ПВС комбината им. Ильича и ПЭВС МК «Азовсталь» (○) и схема расположения постов (▲) Мариупольской гидрометеорологической обсерватории на карте г. Мариуполя

При этом концентрация кислорода снижается обратно пропорционально расстоянию от стока, что позволяет достаточно просто оценивать распределение концентраций в приземном слое атмосферы вокруг металлургических предприятий при известных координатах мест его стока в безветренную погоду. Результаты расчета показывают, что на расстоянии от места стока в 100-200 м концентрация кислорода составляет ниже нормы (15÷17% по объему), что подтверждается замерами. Следует отметить, что при определении концентрации кислорода в приземном слое и наличии близких друг другу стоков, применим принцип суперпозиции (наложения полей концентраций).

Выводы

Таким образом, цель работы достигнута и представленная аналитическая модель в своих рамках достаточно точно оценивает пространственное распределение O₂ в приземном слое окружающей

среды вокруг мест его стока. Определены основные параметры такого режима и факторы влияния. Наиболее опасны участки на расстоянии до 1 км от мест стока О₂. С ростом расстояния от места стока концентрация кислорода увеличивается и уже на расстоянии 2 км достигает 20,8÷20,9% по объему. Преимущество данной методики – отсутствие измерительных средств для определения концентрации О₂. Точность модели требует дополнительной экспериментальной проверки, т.к. для создания полной картины распределения параметров (плотности, массовой концентрации и др.) кислорода необходимо учесть распределение стоков (или притоков) других составляющих атмосферного воздуха (азот, углекислый и угарный газ и др.) и производительности агрегатов для производства (сжатого технологического и технического, сжиженного) кислорода. Целесообразным также является учет направления ветра, влажности, температуры и давления в атмосфере, что позволит получить более точные данные по распределению парциальной плотности кислорода в приземном слое, разработать более эффективные методы для защиты окружающей среды и снижения вредного воздействия на персонал металлургических комбинатов и население близлежащих к ним жилых районов г. Мариуполя.

Список литературы

1. Программа охраны и оздоровления окружающей среды Мариуполя на 2012-2020 гг. – Мариуполь, 2012. – URL: <http://userdocs.ru/geografiya/11131/index.html>
2. Шмидт, М. 1 Мастер-план «Чистый воздух для Мариуполя» / М. Шмидт, А. Капустин, Т. Венцова // Отчет. – Мариуполь, 2015. – URL: <http://www.lib.knigix.ru/23raznoe/85693-1-1-master-plan-chistiy-vozduh-dlya-mariupolya-otchet-prof-mihael-shmidt-prof-aleksey-k.php>.
3. Атмосфера: Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 509 с.
4. Гипоксия. Адаптация, патогенез, клиника / Под ред. Ю. Л. Шевченко. – СПб.: Элби-СПБ, 2000. – 384 с.
5. Замолодчиков, Д. Г. Кислород – основа жизни / Д. Г. Замолодчиков // Вестник РАН. – 2006. – Т.76, №3. – С. 209-218.
6. Овчарова, В. Ф. Гомеокинез в погодную гипоксию и гипероксию / В. Ф. Овчарова // Климат и здоровье человека: Труды Международного симпозиума ВМО/ВОЗ/ЮНЕП СССР, Ленинград, 22–26 сент. 1986 г. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – Т. 2. – С. 142-149.
7. Оксид углерода / Отв. ред. А. Л. Сафонов // Российская энциклопедия по охране труда. 2-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2007. – Т. 2. – 448 с.
8. Fang, Y. Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present / Y. Fang, V. Naik, L. W. Horowitz, D. L. Mauzerall // Atmos. Chem. Phys. – 2013. - V. 13. - P. 1377-1394. – doi: 10.5194/acp-13-1377-2013.
9. Folke, C. Traditional knowledge in social-ecological systems / C. Folke // Ecology and Society.- 2004. – V. 9, no. 3. - P. 7. – doi: 10.5751/ES-01237-090307.
10. Gunderson, L. Integrating ecology and society to navigate turbulence / L. Gunderson, C. Folke, M. Janssen // Ecology and Society. – 2005. – V. 10, no. 1. – P. 39. – doi: 10.5751/ES-01448-100139.
11. Kinzig, A. P. The effects of human socioeconomic status and cultural characteristics on urban patterns of biodiversity / A. P. Kinzig, P. Warren, C. Martin, D. Hope, M. Katti // Ecology and Society. – 2005. – V. 10, no. 1. – P. 23. – doi: 10.5751/ES-01264-100123.
12. Waltner-Toews, D. The evolution of an ecosystem approach: the diamond schematic and an adaptive methodology for ecosystem sustainability and health / D. Waltner-Toews, J. Kay // Ecology and Society. – 2004. – V. 10, no. 1. – P. 38. – doi: 10.5751/ES-01214-100138.
13. Гинзбург, А.С. Содержание кислорода в атмосфере крупных городов и проблемы дыхания / А. С. Гинзбург, А. А. Виноградова, Е. И. Фёдорова, Е. В. Никитич, А. В. Карпов // Геофизические процессы и биосфера. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 5-19.
14. Капустин, Е. А. Одномерная теория струй газа / Е. А. Капустин, Ф. И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2001. – Вип. № 11. – С. 243-249.
15. Лухтура, Ф. И. О закономерностях затопленных струйных течений / Ф. И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2015. – Вып. 30, Т. 1 (24). – С. 202-212.

References (transliterated)

1. Programma okhrany i ozdorovleniya okruzhayushchey sredy Mariupolya na 2012–2020 [The program for the protection and improvement of the environment of Mariupol for 2012–2020], Mariupol', 2012. Available at: <http://userdocs.ru/geografiya/11131/index.html>
2. Shmidt, M. Kapustin, A., Ventsova, T. Master-plan «Chistiy vozdukh dlya Mariupolya» [Master plan “Clean air for Mariupol”], Otchet [Report]. Mariupol', 2015. Available at: <http://www.lib.knigix.ru/23raznoe/85693-1-1-master-plan-chistiy-vozduh-dlya-mariupolya-otchet-prof-mihael-shmidt-prof-aleksey-k.php>.
3. Atmosfera: Spravochnik (spravochnyye dannyye, modeli). [Atmosphere: Reference (reference data, models)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 509.
4. Shevchenko, Yu. L. Gipoksiya. Adaptatsiya, patogenes, klinika [Hypoxia. Adaptation, pathogenesis, clinic]. St. Petersburg, Elbi-SPB Publ., 2000, 384.
5. Zamolodchikov, D. G. Kislorod – osnova zhizni [Oxygen – the basis of life]. Vestnik RAN [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2006, 76, 3, 209-218.
6. Ovcharova, V. F. Gomeokinez v pogodnyuyu gipoksiyu i giperoksiyu [Gomeokinez in weather hypoxia and hyperoxia]. Klimat i zdorov'ye cheloveka: Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma VMO/VOZ/YUNEP SSSR, Leningrad, 22–26 sent. 1986. [Climate and Human Health: Proceedings of the International WMO / WHO / UNEP Symposium of the USSR, Leningrad, 22–26 Sept. 1986]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 2, 142-149.
7. Safonov, A. L. Oksid ugleroda [Carbon monoxide]. Rossiyskaya entsiklopediya po okhrane truda. 2-ye izd. [Russian encyclopedia on labor protection]. 2 ed. Moscow, NTS ENAS Publ., 2007, 2, 448.
8. Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L. W., Mauzerall, D. L. Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to

- present. *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, **13**, 1377–1394, doi: 10.5194/acp-13-1377-2013.
9. Folke, C. Traditional knowledge in social–ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, **9**, 3, 7, doi: 10.5751/ES-01237-090307.
 10. Gunderson, L., Folke, C., Janssen, M. Integrating ecology and society to navigate turbulence. *Ecology and Society*, 2005, **10**, 1, 39, doi: 10.5751/ES-01448-100139.
 11. Kinzig, A. P., Warren, P., Martin, C., Hope, D., Katti, M. The effects of human socioeconomic status and cultural characteristics on urban patterns of biodiversity. *Ecology and Society*, 2005, **10**, 1, 23, doi: 10.5751/ES-01264-100123.
 12. Waltner-Toews, D., Kay, J. The evolution of an ecosystem approach: the diamond schematic and an adaptive methodology for ecosystem sustainability and health. *Ecology and Society*, 2004, **10**, 1, 38, doi: 10.5751/ES-01214-100138.
 13. Ginzburg, A. S., Vinogradova, A.A., Fodorova, Ye. I., Nikitich, Ye. V., Karpov, A. V. Soderzhaniye kisloroda v atmosfere krupnykh gorodov i problemy dykhaniya [Oxygen content in the atmosphere of large cities and respiratory problems]. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera [Geophysical processes and biosphere]*, 2014, **13**, 2, 5-19.
 14. Kapustin, E. A., Lukhtura, F. I. Odnovymirna teoriya strumeniv hazu [One-dimensional theory of gas jets]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnogo universytetu [Bulletin of the Priazovsky State Technical University]*, 2001, **11**, 243-249.
 15. Lukhtura, F. I. O zakonomernostyakh zatoplennyykh struynykh techeniy [About patterns of flooded stream flows]. *Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauki. [Bulletin of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences]*, 2015, **30**, 1 (24), 202-212.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Іванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru.

Fedor Lukhtura – Art. Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment “Priazovsky State Technical University”, Mariupol, Ukraine; email: lukhelena@yandex.ru.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура, Ф. И. Об экологии вокруг промышленных районов г. Мариуполя / **Ф. И. Лухтура** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 67-74. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.10.

Please cite this article as:

Lukhtura, F. About ecology around industrial areas of Mariupol. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 67-74, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.10.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура, Ф. И. Про екологію навколо промислових районів м. Маріуполя / **Ф. І. Лухтура** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 67-74. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.10.

АННОТАЦІЯ Вміст кисню в атмосферному повітрі міст, а також в житлових, офісних і виробничих приміщеннях є найважливішим фактором самопочуття і здоров'я городян. При високій температурі і високій абсолютної вологості приземного повітря, вміст кисню в атмосферному повітрі мінімально, і люди можуть відчувати ознаки гіпоксії. У промислових південних містах, до яких відноситься м. Маріуполь (Україна), існують додаткові чинники, що утруднюють дихання людини: більш висока (щодо навколишнього міста території) температура повітря і забрудненість атмосфери, в т.ч. чадним газом і зваженими частинками. Це призводить у умовах аномальної спеки і промислових викидів до підвищення захворюваності і смертності міського населення. Точні виміри парціального тиску і парціальної густини кисню вимагають спеціального обладнання і методик, оскільки процентний вміст кисню в атмосферному повітрі досить великий, а його зміни відносно малі. Більшість сучасних приладів, які використовуються міськими службами моніторингу атмосфери, орієнтовані на вимірювання відхилень вмісту кисню від норми. Служби моніторингу складу повітря зазвичай не вимірюють цільність кисню, мабуть, через неявного припущення нікчемного впливу зміни метеоумов на його утримання. Крім того, вимірювання маліх змін вмісту кисню в приземному повітрі є досить складним технічним завданням. У роботі представлена спроба аналітичного визначення розподілу концентрацій кисню в приземних шарах атмосфери навколо міського стоку кисню з атмосфери на металургійних підприємствах Маріуполя, приведена аналітична модель стоку кисню з приземного шару на основі теорії «зворотного струменя» в одновимірній постановці. Отримано відповідні ізолінії концентрацій на різних відстанях від міського стоку кисню. При цьому концентрація кисню знижується обернено пропорційно відстані від стоку, що дозволяє досить просто оцінювати розподіл концентрацій в приземному шарі атмосфери навколо металургійних підприємств при відомих координатах міського стоку в безвітряну погоду. Проаналізовано просторова мінливість і епізоди аномального вмісту кисню в приземному повітрі в контексті їх можливого впливу на самопочуття людей.

Ключові слова: атмосфера; металургійні комбінати; кисень; концентрація; шкідливі викиди; аномальна спека; самопочуття населення промислових міст; смертність населення

Поступила (received) 05.10.2019

PROSPECTS OF CULTIVATED MUSHROOMS USE IN TECHNOLOGY OF SAUSAGES

T. STEPANOVA^{1*}, N. KONDRATJUK², N. HAIJUAN¹, K. SUPRUNENKO²

¹ Department of Food Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE

² Department of Food Technologies, Oles Honchar Dnipro national University, Dnipro, UKRAINE

*e-mail: tetiana.stepanova@snaau.edu.ua

ABSTRACT In order to solve the problems associated with expanding range of sausage meat component of high biological value, a search was conducted for alternative, natural and affordable sources of protein. Protein deficiency in human nutrition has led to the search for ways to increase biological value. It was proposed the optimal ratio of components of sausage meat, consisting of meat and mushroom raw materials. The purpose of this combination is to achieve the composition of sausages to the desired approximation of the "ideal protein" with the established technological effects for this production. The main objective of this work is to study the food and taste qualities of the finished product to expand the range of functional sausages at meat processing enterprises in Ukraine and China. Analysis of these data shows that an increase in the level of meat substitution with mushroom raw materials leads to a redistribution of the mass fractions of moisture, protein, fat and ash. The redistribution of these same indicators is affected by the physical state of the introduced mushroom raw material: powder or finely crushed mass. It was recorded a decrease in the mass fraction of fat by approximately 3% and 6%, respectively. Therefore, it was noted a decrease in energy value from 362 kcal to 335-304 kcal. The proportion of carbohydrates in the experimental samples has increased by an average of 1-2%. The mass fraction of protein remained almost unchanged, but the composition of the protein was closer to the "ideal protein". According to the results of organoleptic evaluation, it was found that when developing recipes for cooked smoked sausages, it is advisable to add boiled mushrooms in an amount of 15 - 20% in finely crushed form. It is advisable to add in the amount of 3.0 - 7.0% at the mixing stage in the form of a dry powder of fried mushrooms. The data presented in this article make it possible to assess the prospects of the food industry in the production of sausages enriched with semi-finished products of varying degrees of readiness based on cultivated mushrooms. The results of the analytical study reflect the unique degree of the cultivated mushrooms amino acid composition approximation to the "ideal protein". Particular attention was paid to essential (limiting) amino acids and their content in new types of sausages

Keywords: cultivated mushrooms; mushroom powder; biological value; sausages; protein deficiency

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ У ТЕХНОЛОГІЇ КОВБАСНИХ ВИРОБІВ

T. M. СТЕПАНОВА^{1*}, Н. В. КОНДРАТЮК², Н. ХАЙЦЗЮНЬ¹, К. Є. СУПРУНЕНКО²

¹ кафедра технології харчування, Сумський національний аграрний університет, Суми, УКРАЇНА

² кафедра харчових технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, УКРАЇНА

АННОТАЦІЯ Для вирішення проблем, пов'язаних з розширенням асортименту ковбасних виробів підвищеної біологічної цінності, був проведений пошук альтернативних, природних і доступних джерел білка. Такими пропонується розглядати культивовані гриби. Дефіцит білка в раціон харчування людей, давно вже став причиною пошуку способів підвищення біологічної цінності, тому ми пропонуємо оптимальні співвідношення компонентів ковбасного фаршу, що складається з мясного та грибного сировини. Метою такого комбінування є досягнення складу ковбасних виробів до бажаного наближення до "ідеального білку" при встановлених технологічних ефектах для розширення асортименту функціональних ковбасних виробів на мясопереробних підприємствах України і Китаю. Аналіз наведених даних показує, що зі збільшенням рівня заміни мяса грибним сировиною проходить перерозподіл масових часток вологи, білка, жиру і зольності. На перерозподіл цих же показників впливає фізичний стан внесеної грибного сировини: порошок або тонко подрібнена маса. Було зафіксовано зменшення масової частки жиру приблизно на 3% і 6% відповідно. Отже, зниження енергетичної цінності: з 362 ккал до 335 - 304 ккал. Частка вуглеводів у дослідних зразках збільшувалася в середньому на 1-2%. Масова частка білка залишалася практично незмінною, але склад білка був більший до "ідеального білку". За результатами органолептичної оцінки з'ясовано, що при розробці рецептів варено-копченіх ковбас доцільно вносити варені гриби в кількості 15 - 20% в тонкоподрібненому вигляді. У вигляді сухого порошку з обсмажених грибів - в кількості 3,0 - 7,0% на етапі перемішування. Наведені в статті дані, дозволяють оцінити перспективу напрямків харчової промисловості в сфері виробництва ковбасних виробів, зображені напівфабрикатами різного ступеня готовності на основі культивованих грибів. Результати аналітичного дослідження, відображають унікальну ступінь наближення амінокислотного складу культивованих грибів до "ідеального білку". Особливу увагу приділено есенціальним (лімітующим) амінокислотам, їх вмісту в складі нових видів ковбасних виробів.

Ключові слова: культивовані гриби; грибний порошок; біологічна цінність; ковбасні вироби; дефіцит білка

Introduction

Food products are an integral and non-alternative part of the human life support fund. Long-term deficiency

in the diet of certain groups of food products, upsets the balance of food components, and synthesis of substances. The search and involvement in the technological process

of raw materials that have a balanced chemical composition and have a functional effect is the key to creating high-quality food products that have a beneficial effect on the human body. One way to develop technology is to combine various types of raw materials to achieve a certain type of balance: nutrient, micro- and macroelement, vitamin, fatty acid and the like. However, protein deficiency remains a major problem for humanity. Cultivated mushrooms have a balanced composition of nutrients, they also grow quickly, without requiring expensive equipment for growing, are easily processed, have a pleasant taste and aroma when ready [1]. Fungi have antioxidant, antitumor and anti-inflammatory properties [2]. Sausages are a fairly demanded product in both Ukraine and China. However, premade sausages differ in organoleptic characteristics, based on the taste preferences of different nations. However, the technological process for the production of sausages does not have fundamental disagreements. Thereby, the use of fungi raw materials in sausage technology as an alternative source of protein and nutrients is very relevant especially for Ukraine and China.

The aim of the study

Analysis of the chemical, in particular amino acid composition of cultivated edible mushrooms with the aim of using them in the technology of cooked smoked sausages enriched with functional ingredients.

Statement of the main material

Cultivated edible mushrooms are widely popular among the population due to their high palatability, low calorie content and low cholesterol content. According to FOA / WHO statistics, China holds a leading position in the market of cultivated fungi producers (up to 5 thousand tons / year) [3].

Edible cultivated mushrooms are widely represented on the modern market, such as (*Agaricus bisporus* bicuspid champignons, Brazilian champignon *Agaricus subrufescens*, common oyster mushroom *Pleurotus ostreatus*, *flamulin* or *enokitake* *Flammulina velutipes*, edible lentil or *shiitodedes* etc.). The nutritional value of mushrooms depends on the species, stage of development and environmental conditions [4].

The raw protein content in mushrooms ranges from 12 to 35%, depending on the species. The composition of free amino acids is very different, but in general they are rich in threonine and valine, but are poor in sulfur-containing amino acids.

The carbohydrate profile of mushrooms is represented by starch, pentoses, hexoses, disaccharides, aminocucriva. The total carbohydrate content in mushrooms ranges from 26-82% based on dry matter in different mushrooms. The raw fibrous composition of the fungus consists of the frequently assimilated polysaccharides and chitin.

Edible fungi are usually low in lipids with a higher proportion of polyunsaturated fatty acids. All this indicates a low calorie content of mushrooms. In addition, mushrooms do not contain cholesterol. But they have ergosterol, which acts as a precursor to the synthesis of vitamin D in the human body.

The nutritional value of various types of cultivated edible mushrooms, which are planned to be used in the technology of cooked smoked sausages tastes of the Ukrainian and Chinese populations, are represented in table 1 [4].

Table 1 – Nutritional value of cultivated edible mushrooms (in dry matter gram per 100 g)

Kinds of mushrooms	Proteins	Fats	Carbohyd rates	Ash
<i>Agaricus bisporous</i>	33.48	3.10	46.17	5.70
<i>Pleurotus ostreatus</i>	30.40	2.20	57.60	9.80
<i>Flammulina velutipes</i>	17.60	1.90	73.10	7.40
<i>Lentinula edodes</i>	32.93	3.73	47.60	5.20
<i>Vovarella volvaceae</i>	37.50	2.60	54.80	1.10

As can be seen from the table 1, high nutritional value determines the widespread use of mushrooms in the technology of low-calorie production, due to the low content of fats in them, as well as an alternative source of protein.

Due to the unique chemical composition, fungi are a promising functional raw material with antioxidant, antimicrobial, hepatosis and anti-cancer effects [5].

Mushrooms occupy a leading position in terms of protein content compared to vegetables [6]. The high biological value of fungal proteins is due to the content of essential amino acids in them. The content of essential amino acids in proteins of fungi compared to the "ideal protein" are shown in table 2 [2].

As can be seen from table 2, cultivated mushrooms have a significant content of essential amino acids, close to their amount in the "ideal protein", which allows us to predict the prospects of using this type of raw material as a source of high-grade protein and minnow meat.

The carbohydrate component of fungi is predominantly represented by β -glucans by polymers, as well as chitin, mannan, galactans and xylan [7]. The digestive enzymes secreted by the pancreas cannot hydrolyze the β -glucosidic bond, fungal polysaccharides, therefore, indigestible carbohydrates can act as prebiotics in the human body [8]. The authors [9] noted the influence of non-digestible polysaccharides of fungi on the growth of

Table 2 – The content of essential amino acids in proteins of mushrooms, compared with the "ideal protein"

Amino acids name	The content of this amino acid, g per 100 g of protein								
	Perfect protein	Oyster mushroom	Shiitake	Enoki	Flammulina velutipes	Vovarella volvaceae	Agaricus bisporus	Pleurotus eryngii	Straw mushroom
Essential amino acids	36.0	42.7	45.7	77.9	31.6	39.4	69.3	38.8	43.8
Valine	5.0	5.0	5.2	7.1	3.0	2.7	8.1	4.3	6.3
Isoleucine	4.0	3.8	4.7	11.9	3.6	4.0	16.4	2.3	5.3
Luecine	7.0	8.8	9.2	11.4	5.6	8.2	14.3	2.3	7.3
Lysine	5.5	5.0	5.6	15.4	3.9	5.2	13.0	0.6	6.2
Methionine +Cystine	3.5	7.5	6.0	7.1	3.8	5.4	4.3	15.6	6.7
Threonine	4.0	4.2	4.8	7.8	3.4	5.0	4.3	3.0	5.2
Phenylalanine +Tyrosine	6	6.9	9.0	13.7	7.1	7.0	5.6	9.7	6.7
Tryptophan	1	1.5	1.2	3.4	1.2	1.9	3.2	1.0	0.1
Nonessential amino acids	-	54.0	55.2	100.4	34.7	50.9	78.0	34.5	52.7
Arginine	-	5.4	5.3	12.8	4.3	5.5	8.8	2.4	4.9
Glutamic acid	-	16.6	11.5	27.8	7.3	11.9	12.7	6.3	14.0
Alanine	-	8.2	9.9	10.3	5.4	8.2	9.2	4.2	9.7
Glycine	-	6.1	10.3	8.0	4.1	5.4	6.7	2.6	6.9
Asparagine acid	-	9.8	7.8	16.9	7.3	10.5	22.9	7.3	8.6
Proline	-	1.7	3.4	12.2	1.9	3.0	8.2	7.7	2.1
Serine	-	4.2	4.7	7.0	2.7	3.4	7.4	2.9	4.2
Histidine	-	1.9	2.2	5.5	1.5	2.9	2.0	1.3	2.3
Total amino acid	-	96.7	100.9	178.4	66.2	90.3	147.3	73.3	96.5

beneficial bacteria in the human gastrointestinal tract. A stable antimicrobial effect against a number of pathogens (*Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella typhimurium*) was also noted [10].

The carbohydrate component of fungi is predominantly represented by β -glucans by polymers, as well as chitin, mannan, galactans and xylan [7]. The digestive enzymes secreted by the pancreas cannot hydrolyze the β -glucosidic bond, fungal polysaccharides, therefore, indigestible carbohydrates can act as prebiotics in the human body [8]. The authors [9] noted the influence of non-digestible polysaccharides of fungi on the growth of beneficial bacteria in the human gastrointestinal tract. A stable antimicrobial effect against a number of pathogens (*Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* and *Salmonella typhimurium*) was also noted [10].

Edible cultivated mushrooms are a good source of vitamins, in particular B vitamins (thiamine B1, riboflavin B2, niacin B3, pantothenic acid B5 and folate B9), vitamins D and E [11], as well as minerals (K, Ca, P, Na, Mg) [12].

Thus, mushrooms are quite attractive as food ingredients for enrichment, for their nutritional value, safety and affordability.

The discussion of the results

Given high nutritional and biological value, edible cultivated mushrooms are widely used in the food industry. However, the technology of such popular products as cooked smoked sausages requires the attention and intervention of scientific technologists.

The authors of [13] found that they were in good condition for the hour of free champagne at the

fermentation of fermented pork sausages. There was also a reduction in the number of products for the market share of frequent replacement of meat from the Syrovini.

While using mushroom raw materials in amount of 15-30% in the technology of beef sausages, the authors [14] of established improvements in the technological properties of the finished product, and an increase in the

content of essential amino acids to 10%, as well as a decrease in fat content compared to analogues.

The authors note [15] the improvement in the quality indicators of the finished product when using edible cultivated mushrooms in the form of a powder in the production of chicken sausages.

Table 3 shows the chemical composition of the developed samples.

Table 3 – The chemical composition of the samples developed cooked smoked sausages and their analogue

Sample Name	Content, %					Energy value, kcal
	Humidity	Protein	Fat	Carbohydrate	Ash	
Sausage cooked smoked "Cervelat" (control)	29,1±0,1	24,0±0,1	40,5±0,1	0,20±0,01	6,2±0,1	468
Sausage cooked smoked with fried mushroom powder (sample 1)	31,2±0,1	23,3±0,1	39,4±0,1	0,14±0,01	6,1±0,1	455
Sausage cooked smoked with finely ground mass of cooked mushrooms (sample 2)	41,6±0,1	19,6±0,1	32,6±0,1	0,94±0,01	5,2±0,1	381

For the quality of meat and sausage minced meat, as well as finished products corresponds to such a rheological indicator as water-binding ability.

During cooking, the free moisture contained in the mushrooms is removed, and bound contains protein and hydrocarbon structures. As a result of fine grinding of the tissues of meat and mushrooms, the particle size decreases, and their total surface increases. Moisture turns into surface-bound moisture; the losses of sausages during

heat treatment were insignificant. The use of mushroom raw materials in the production of cooked smoked sausages affected the content of the mass fraction of moisture. The value of the humidity indicator presented in the Table 3. The results of the organoleptic assessment (on a 5-point scale) of the quality of cooked smoked control sausages and experimental samples using a mushroom ingredient are presented in table 4.

Table 4 – Organoleptic characteristics of boiled sausages of research and control samples

Parameter name	Sausage cooked smoked "Cervelat" (control)	Sausage cooked smoked with fried mushroom powder (sample 1)	Sausage cooked smoked with finely ground mass of cooked mushrooms (sample 2)
Appear	Attractive cutaway appearance, evenly mixed meat with single pores		
Cutaway color	Pink	Pale pink	Gray pink
Smell and Taste	Pleasant, characteristic of this product, without strangers, with the aroma of spices, moderately salty	Well defined, pleasant, without extraneous smacks and odors	Well defined, pleasant, without extraneous smacks and odors
Consistency	Dense	Tender, firm, tight	Tender, firm, tight

Conclusions

Thereby, the high nutritional and biological value of mushrooms, the indicated functional properties of edible cultivated mushrooms allow their use in the production of cooked smoked sausages in order to improve consumer properties, reduce calorie content, as well as produce functional products. In addition, for the Ukrainian population, replacing part of the sausage meat with a finely ground mass of boiled mushrooms or with dry powder from fried mushrooms will reduce the use of soya-based minced meat substitutes. For the Chinese population, the problem of processing mushrooms, whose production is more than 5 thousand tons per year, will be solved.

Список літератури

1. **Mattila, P.** Functional Properties of Edible Mushrooms / **P. Mattila** // *Nutrition*. – 2000. – № 16. – P. 694-696. – doi: 10.1016/s0899-9007(00)00341-5.
2. **Wani, B. A.** Nutritional and medicinal importance of mushrooms / **B. A. Wani** // *Journal of medicinal plant research*. – 2010. – № 4(24). – P. 2598-2604. – doi:10/5897/JMPR09.565.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division (FAOSTAT) Crops Production. – URL: <http://faostat.fao.org>.
4. **Suresh, C.** Nutritional and medicinal aspects of edible mushrooms / **C. Suresh** // *International Journal of Agriculture Sciences*. – 2006. – № 2. – P. 647-651.
5. **Khatun, S.** Mushroom as a Potential Source of Nutraceuticals / **S. Khatun** // *American Journal of*

- Experimental Agriculture.* – 2012. – № 2(1). – P. 47-73. – doi: 10.9734/AJEA/2012/492.
6. **Wang, X. M.** A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China / **X. M. Wang** // *Food Chemistry*. – 2014. – № 151. – P. 279–285. – doi: 10.1016/j.foodchem.2013.11.062.
7. **Friedman, M.** Mushroom Polysaccharides: Chemistry and Antioesity, Antidiabetes, Anticancer, and Antibiotic Properties in Cells, Rodents, and Humans / **M. Friedman** // *Foods*. – 2016. – № 5(4). – P. 2-40. – doi: 10.3390/foods5040080.
8. **Sawangwan, T.** Study of prebiotic properties from edible mushroom extraction / **T. Sawangwan** // *Agriculture and Natural Resources*. – 2018. – № 52(6). – P. 519-524. – doi: 10.1016/j.anres.2018.11.020.
9. **Gao, S.** Nondigestible carbohydrates isolated from medicinal mushroom sclerotia as novel prebiotics / **S. Gao** // *International Journal of Medicinal Mushrooms*. – 2009. – № 11. – P. 1-8. – doi: 10.1615/IntJMedMushr.v11.i1.10.
10. **Tinrat, S.** Antimicrobial activities and synergistic effects of the combination of some edible mushroom extracts with antibiotics against pathogenic strains / **S. Tinrat** // *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. – 2015. – № 35. – P. 253-262.
11. **Kutaiba, I. A.** Chemical composition and nutritional value of edible mushrooms: a review / **I. A. Kutaiba** // *World Journal of Pharmaceutical Research*. – 2018. – № 8 (1). – P. 31-46. – doi: 10.20959/wjpr20193-14261.
12. **Mallikarjuna, S. E.** Mineral Composition of Four Edible Mushrooms / **S. E. Mallikarjuna** // *Journal of Chemistry*. – 2013. – № 8 (1). – P. 31-46. – doi: 10.1155/2013/805284.
13. **Chockchaisawasdee, S.** Development of fermented oyster-mushroom sausage / **S. Chockchaisawasdee** // *Asian Journal of Food and Agro Industry*. – 2010. – № 3 (01). – P. 35-43.
14. **Dalaeen, S.** Utilization of mushroom fungi in processing of meat sausage / **S. Dalaeen** // *Research on Crops*. – 2018. – № 19 (2). – P. 294-299. – doi: 10.5958/2348-7542.2018.00044.X.
15. **Jo, K.** Quality characteristics of low-salt chicken sausage supplemented with a winter mushroom powder / **K. Jo** // *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*. – 2018. – № 38 (4). – P. 768-779. – doi: 10.5851/kosfa.2018.e15.
2. **Wani, B. A.** Nutritional and medicinal importance of mushrooms. *Journal of medicinal plant research*, 2010, **4**(24), 2598-2604, doi:10/5897/JMPR09.565.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division (FAOSTAT) Crops Production. Available at: <http://faostat.fao.org>.
4. **Suresh, C.** Nutritional and medicinal aspects of edible mushrooms. *International Journal of Agriculture Sciences*, 2006, **2**, 647-651.
5. **Khatun, S.** Mushroom as a Potential Source of Nutraceuticals. *American Journal of Experimental Agriculture*, 2012, **2**(1), 47-73, doi: 10.9734/AJEA/2012/492.
6. **Wang, X. M.** A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China. *Food Chemistry*, 2014, **151**, 279–285, doi: 10.1016/j.foodchem.2013.11.062.
7. **Friedman, M.** Mushroom Polysaccharides: Chemistry and Antioesity, Antidiabetes, Anticancer, and Antibiotic Properties in Cells, Rodents, and Humans. *Foods*, 2016, **5**(4), 2-40, doi: 10.3390/foods5040080.
8. **Sawangwan, T.** Study of prebiotic properties from edible mushroom extraction. *Agriculture and Natural Resources*, 2018, **52**(6), 519-524, doi: 10.1016/j.anres.2018.11.020.
9. **Gao, S.** Nondigestible carbohydrates isolated from medicinal mushroom sclerotia as novel prebiotics. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2009, **11**, 1-8, doi: 10.1615/IntJMedMushr.v11.i1.10.
10. **Tinrat, S.** Antimicrobial activities and synergistic effects of the combination of some edible mushroom extracts with antibiotics against pathogenic strains. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 2015, **35**, 253-262.
11. **Kutaiba, I. A.** Chemical composition and nutritional value of edible mushrooms: a review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 2018, **8** (1), 31-46, doi: 10.20959/wjpr20193-14261.
12. **Mallikarjuna, S. E.** Mineral Composition of Four Edible Mushrooms. *Journal of Chemistry*, 2013, **8** (1), 31-46, doi: 10.1155/2013/805284.
13. **Chockchaisawasdee, S.** Development of fermented oyster-mushroom sausage. *Asian Journal of Food and Agro Industry*, 2010, **3** (01), 35-43.
14. **Dalaeen, S.** Utilization of mushroom fungi in processing of meat sausage. *Research on Crops*, 2018, **19** (2), 294-299, doi: 10.5958/2348-7542.2018.00044.X.
15. **Jo, K.** Quality characteristics of low-salt chicken sausage supplemented with a winter mushroom powder. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2018, **38** (4), 768-779, doi: 10.5851/kosfa.2018.e15.

References (transliterated)

1. **Mattila, P.** Functional Properties of Edible Mushrooms. *Nutrition*, 2000, **16**, 694-696, doi: 10.1016/s0899-9007(00)00341-5.

Сведения об авторах (About authors)

Tetiana Stepanova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department of Food Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9392-3773>; e-mail: tetiana.stepanova@snaeu.edu.ua.

Степанова Тетяна Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології харчування, Сумський національний аграрний університет, м Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9392-3773>; e-mail: tetiana.stepanova@snaeu.edu.ua.

Natalia Kondratjuk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Head of the Department, Department of Food Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4578-9108>; e-mail: kondratjukn3105@gmail.com.

Кондратюк Наталя Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри харчових технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4578-9108>; e-mail: kondratjukn3105@gmail.com.

Nan Haijuan – Postgraduate student, Department of Food Technology, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9392-3773>; e-mail: nanhaijuan1@163.com.

Нан Хайдзюн – аспірант кафедри технології харчування, Сумський національний аграрний університет, м Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9392-3773>; e-mail: nanhaijuan1@163.com.

Katerina Suprunenko – Assistant, Department of Food Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8741-5449>; e-mail: suprunenko.katerina90@gmail.com.

Супруненко Катерина Євгенівна – асистент кафедри харчових технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8741-5449>; e-mail: suprunenko.katerina90@gmail.com.

Please cite this article as:

Stepanova, T., Kondratjuk, N., Haijuan, N., Suprunenko, K. Prospects of cultivated mushrooms use in technology of sausages. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 75–80, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.11.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю таким чином

Степанова, Т. М. Перспективи використання культивованих грибів у технології ковбасних виробів / **Т. М. Степанова, Н. В. Кондратюк, Н. Хайдзюн, К. Е. Супруненко** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 75–80. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.11.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Степанова, Т. М. Перспективы использования культивированных грибов в технологии колбасных изделий / **Т. М. Степанова, Н. В. Кондратюк, Н. Хайдзюн, К. Е. Супруненко** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 75–80. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.11.

АННОТАЦИЯ Для решения проблем, связанных с расширением ассортимента колбасных изделий повышенной биологической ценности, был проведен поиск альтернативных, природных и доступных источников белка. Таковыми предлагаются рассматривать культивированные грибы. Дефицит белка в рационах питания людей, давно уже стал причиной поиска способов повышения биологической ценности, поэтому мы предлагаем оптимальные соотношения компонентов колбасного фарша, состоящего из мясного и грибного сырья. Целью такого комбинирования является достижение состава колбасных изделий до желаемого приближения к "идеальному белку" при установленных технологических эффектах для данного производства. Основной задачей работы является изучение пищевых и вкусовых качеств готовой продукции для расширения ассортимента функциональных колбасных изделий на мясоперерабатывающих предприятиях Украины и Китая. Анализ приведенных данных показывает, что с увеличением уровня замены мяса грибным сырьем проходит перераспределение массовых долей влаги, белка, жира и зольности. На перераспределение этих же показателей влияет физическое состояние вносимого грибного сырья: порошок или тонко измельченная масса. Было зафиксировано уменьшение массовой доли жира приблизительно на 3% и 6% соответственно. Следовательно, снижение энергетической ценности: с 362 ккал до 335-304 ккал. Доля углеводов в опытных образцах увеличивалась в среднем на 1-2 %. Массовая доля белка оставалась практически неизменной, но состав белка был более близок к "идеальному белку". По результатам органолептической оценки выясниено, что при разработке рецептур варено-копченых колбас целесообразно вносить вареные грибы в количестве 15-20% в тонкоизмельченном виде. В виде сухого порошка из обжаренных грибов - в количестве 3,0-7,0 % на этапе перемешивания. Приведенные в статье данные, позволяют оценить перспективу направлений пищевой промышленности в сфере производства колбасных изделий, обогащенных полуфабрикатами различной степени готовности на основе культивированных грибов. Результаты аналитического исследования, отражают уникальную степень приближения аминокислотного состава культивированных грибов к "идеальному белку". Особое внимание уделено эссенциальным (лимитирующем) аминокислотам, их содержанию в составе новых видов колбасных изделий.

Ключевые слова: культивированные грибы; грибной порошок; биологическая ценность; колбасные изделия; дефицит белка

Поступила (received) 02.10.2019

ДОСЛДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРИТІВ В СИСТЕМІ NiO-CoO-ZnO

Л. А. ФРОЛОВА

кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ УДХТУ, УКРАЇНА
e-mail: 19kozak83@gmail.com

АННОТАЦІЯ Оксидні системи, що містять катіони перехідних металів, мають важливі технологічні властивості. Так, наприклад, ферити кобальту, нікелю, мангану, цинку використовують в магнітних, електрических матеріалах, як катализатори ряду реакцій. Технологічні схеми одержання таких сполук вимагають використання високотемпературної термообробки та складного обладнання. Застосування гідрофазних хіміческих методів синтезу є основою одержання феритів перехідних металів із заданим комплексом властивостей. Характерною тенденцією останнього часу є розробка технологій одержання саме нанодисперсних феритів. В роботі вивчено залежність магнітних характеристик феритів від складу в системі CoO-NiO-ZnO комплексним методом. Ферити Ni-Zn, Co-Zn, Co-Ni синтезували у вигляді наночастинок з використанням контактної нерівноважної низькотемпературної плазми. Кристалічна мікроструктура зразків була з'ясована з використанням рентгеноструктурного та рентгенофазового аналізів. Встановлено, що для шпінельних феритів, зокрема, вибір двовалентного катіона безпосередньо визначає їх магнітну поведінку. Симплексним методом визначено ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивну силу. Магнітні дослідження з використанням вібраційного магнетометру показали, що за даних умов синтезу спостерігаються низькі значення намагніченості для Ni-Zn феритів і високі для всього ряду Co-Zn, Co-Ni феритів. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах. Також було виявлено позитивний вплив катіонів нікелю на значення намагніченості насичення феритів по стороні трикутника Ni-Zn і протилежне по стороні Ni-Co. Спектри ЕПР показали, що значення резонансного поля і ширини лінії відповідає значенню магнітного насичення.

Ключові слова: ферит кобальту; ферит цинку; ферит нікелю; комплексний метод; ферит кобальту; магнітна наночастинка; рентгенівська дифракція

RESEARCH OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF FEERITES IN THE NiO-CoO-ZnO SYSTEM

L. FROLOVA

Department of Inorganic Materials Technology and Ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT Oxide systems containing transition metal cations possess important technological properties. So, for example, ferrites of cobalt, nickel, manganese, zinc are used in magnetic, electrical materials as catalysts for a number of reactions. Technological schemes for producing such compounds require the use of high-temperature heat treatment and sophisticated equipment. The use of hydrophase chemical synthesis methods is the basis for producing ferrites of transition materials with a given set of properties. A characteristic recent trend is the development of technologies for producing nanodispersed ferrites. The dependence of the magnetic characteristics of ferrites in the CoO-NiO-ZnO system by the simplex method was studied. Ferrites Ni-Zn, Co-Zn, Co-Ni were synthesized in the form of nanoparticles using the method of processing contact nonequilibrium low-temperature plasma. The crystalline microstructure of the samples was elucidated using X-ray diffraction and X-ray diffraction methods. It has been established that for spinel ferrites, in particular, the choice of a divalent cation directly determines their magnetic behavior. The effect of the mutual influence of the content of various cations on the saturation magnetization and the coercive force by the simplex method is determined. Magnetic studies using a vibrating magnetometer showed that under these synthesis conditions, low magnetization values are observed for Ni-Zn ferrites and high for the entire series of Co-Zn, Co-Ni ferrites. An increase in the content of cobalt cations leads to an increase in coercive force in all compositions. A positive effect of nickel cations on the value of saturation magnetization of ferrites on the side of the Ni-Zn triangle and the opposite on the side of Ni-Co, EPR spectra showed that the value of the resonance field and line width corresponds to the value of magnetic saturation.

Keywords: cobalt ferrite; zinc ferrite; nickel ferrite; simplex method; cobalt ferrite; magnetic nanoparticles; X-ray diffraction

Вступ

Оксидні системи, що містять катіони перехідних металів володіють важливими технологічними властивостями. Так, наприклад, ферити кобальту, нікелю, мангану, цинку використовують в магнітних, електрических матеріалах, як катализатори ряду реакцій [1-4]. Технологічні схеми одержання таких сполук вимагають, загалом, використання високотемпературної термообробки та складного обладнання. Це стосується традиційних

методів. Наприклад, при синтезі фериту нікелю, кобальту і цинку використовують гідротермальні методи, мікрохвильову обробку [4-8]. Застосування гідрофазних хіміческих методів синтезу є основою одержання феритів перехідних металів із заданим комплексом властивостей. Характерною тенденцією останнього часу є саме розробка технологій одержання нанодисперсних феритів.

Відомо, що нанорозмірні ферити-шпінелі проявляють властивості, які неможливі для консолідованих систем [1,2]. Так, перехід феритів

металів зі змінною валентністю в нанорозмірний стан супроводжується значною зміною їх магнітних властивостей (коерцитивна сила, велика намагніченість, кристалографічна анізотропія, температура Кюрі). Автори [8-11] показують, що на властивості дуже впливають значні енергетичні ефекти у випадку додаткового застосування високоенергетичних короткочасних впливів. Створення адекватних моделей магнітного стану подібних матеріалів є однією з актуальних задач матеріалознавства. Пов'язано це як з широкими можливостями їх практичного використання, так і з необхідністю розвитку теоретичної уяви про вплив розміру та структури частинок на магнітні властивості. Єдиної теорії, що пояснює значні магнітні властивості у нанодисперсних магнітних матеріалів немає. В даний час існують основні гіпотези, що пояснюють ефект, який виникає при намагнічуванні нанодисперсних частинок. Наприклад, „оболонкова” модель, що дає якісне пояснення ефектів та теорія Неєля. Теорія Неєля встановлює залежність намагніченості від розподілу катіонів по підграткам.

Таким чином, макроскопічні характеристики магнітних матеріалів залежать від атомної структури. Розуміння особливостей кристалічної структури необхідно для синтезу магнітних наноматеріалів з оптимальними властивостями. Для шпінельних ферітів, зокрема, вибір двовалентного катіона і його розподіл між тетраедричних і октаедричних позицій безпосередньо визначають їх магнітну поведінку. Ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивної сили доцільно досліджувати з використанням симплексного методу.

В даній роботі, властивості плазмової обробки були використані для синтезу складних неорганічних сполук в системі NiO-CoO-ZnO. Технології синтезу ферітів за допомогою дії контактної низькотемпературної нерівноважної плазми (КНП) докладно розглянуті в роботах [9,11]. Отримані результати потребують подальших досліджень, що встановлюють залежності магнітних властивостей від складу.

Мета роботи

Метою даної роботи є вивчення взаємозв'язку між магнітними характеристиками ферітів та складом ферітів загального виду MeFe_2O_4 (Me - Ni, Co, Zn), отриманих при використанні плазмової технології.

Методика проведення експерименту

В якості прекурсорів використовувалися водні 0,5M розчини ферум(II) сульфату і кобальт(II) сульфату, цинк сульфату та 2M розчин натрій гідроксиду. Підготовка нанорозмірного феріту проводилася на лабораторній плазмовій хімічній установці, що детально описана в роботі [11]. Для дослідження впливових компонентів на властивості ферітів використовували симплекс-решітчасте планування, що вимагає мінімальну кількість

експериментів для визначення впливу факторів за вибраними функціями відгуку. В якості факторів x_1 x_2 x_3 були обрані мольні концентрації катіонів кобальту, нікелю і цинку відповідно. Отриманий продукт промивали і сушили для подальшого дослідження. Фазовий склад і структуру зразків фериту вивчали з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-2 с Си-Ка випромінюванням. Дані рентгенофазового аналізу використовували для характеристики розміру частинок і морфології отриманих зразків. Параметр кристалічної решітки, розмір кристалітів визначали виходячи з експериментальних рентгенівських дифрактограм за методом Селякова-Шеррера.

Магнітні властивості кінцевого порошку вивчалися з використанням вібраційного магнітометра. План проведення експериментів показаний у табл. 1.

Функції відгуку були обрані наступні: коерцитивна сила (Hc); намагніченість насичення (Mc), резонансне поле (S), ширина піка спектра електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) (ΔH_{max}), інтенсивність піку ЕПР спектра (I).

Поверхня відгуку на діаграмах «склад-властивості» зображена з допомогою ізоліній.

Таблиця 1 - Матриця планування симплекс-решітчастого плану {3,3}

№	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Zn</i>	<i>y</i>
1	1,0	0,0	0,0	y_1
2	0,0	1,0	0,0	y_2
3	0,0	0,0	1,0	y_3
4	0,333	0,667	0,0	y_{112}
5	0,667	0,333	0,0	y_{122}
6	0,0	0,667	0,333	y_{223}
7	0,0	0,333	0,667	y_{233}
8	0,333	0,0	0,667	y_{133}
9	0,667	0,0	0,333	y_{113}
10	0,333	0,333	0,333	y_{123}

Результати та їх обговорення

Відомо, що магнітні властивості ферітів, отриманих плазмовим методом залежать від початкового pH розчину солі ферум(II) або суспензії $\text{Fe}(\text{OH})_2$, температури, початкової концентрації іонів феруму(II) у розчині або ферум(II) гідроксиду в суспензії [10,11]. Одним із найголовніших факторів є катіонний склад ферітів. У відповідності з симплексним методом були синтезовані десять зразків і дослідженні їх властивості.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що магнітні показники ферітів в системах CoO-NiO-ZnO , залежать від складу. Підвищення вмісту кобальту в системі приводить до збільшення коерцитивної сили та намагніченості. Збільшення вмісту в ферітах CoO від 0,25 - 0,75 мол. частин, обумовлює значний ріст коерцитивної сили від 0 до 1140 Ое. Отримані результати представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики феритів Co-Zn-Ni

№ складу	Hc	Ms	Резонансне поле S, мT	I, від.од.	ΔH, мT
1.	1124	105,4	547	2700	398,7
2.	955	48,76	530	2242	383,65
3.	503	27,80	445	3325	384
4.	2	26,05	364	2429	141,5
5.	7	19,00	359	3824	63
6.	9	7,70	345	3693	29,71
7.	19	3,93	342	3008	21,83
8.	1	37,26	382	2538	156
9.	70	74,94	501	1121	366
10.	37	5,37	358	3189	122

Даний факт підтверджується також зміщенням значень параметрів кристалічної решітки d (8,35 нм) у бік менших значень (8,32 нм) (рис. 3), також зменшується показник ширини полоси на ЕПР спектрі.

Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння регресії, які адекватно описують взаємозв'язок магнітних показників зі складом дослідних зразків.

$$Hc = 1124,0_1x_1 + 749,81x_1x_2 - 2409,19x_1x_3 + 523,69x_1x_2(x_1 - x_2) - 2023,50x_1x_3(x_1 - x_3) - 4305,38x_1x_2x_3$$

$$Ms = 106x_1 + 26x_2 - 125x_1x_2 + 57911x_2x_3 - 173732x_1x_2x_3$$

Отримані рівняння регресії використовували для побудови ізоліній магнітних характеристик феритів в досліджуваному факторному просторі (рис. 1 та рис. 2).

Найбільший показник коерцитивної сили відповідає складу, що вміщує максимальну кількість катіонів кобальту. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах. Також було виявлено позитивний вплив катіонів нікелю на значення намагніченості насичення феритів по стороні трикутника Ni-Zn і протилежне по стороні Ni-Co (рис. 1). Причому, значення намагніченості насичення в більшій мірі залежить від вмісту катіонів кобальту. Найбільші магнітні показники відповідають максимальному вмісту кобальту. Таким чином, магнітні ферити з підвищеною коерцитивної силою відповідають складам 1,2,3, а магнітні ферити з низькою коерцитивної силою складами 4,5,6,7. На діаграмах можна відокремити рівносторонній трикутник з координатами вершин Co(1,0,0)-Ni(0,75,0,0)-Zn(0,25,0,0), якому відповідає область більш високих значень намагніченості насичення.

Зіставлення основних характеристик на ЕПР спектрах з магнітними властивостями дозволяє пояснити механізм дії і встановити внесок присутності феримагнітних катіонів і ступеня оберненості шпінелі. Рентгенофазовий аналіз показав, що зразки містять феромагнітну фазу ймовірно, MeFe_2O_4 і антиферомагнітний $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Магнітні характеристики відповідають даним рентгенофазового аналізу і даними ЕПР (рис. 1, 2, 4).

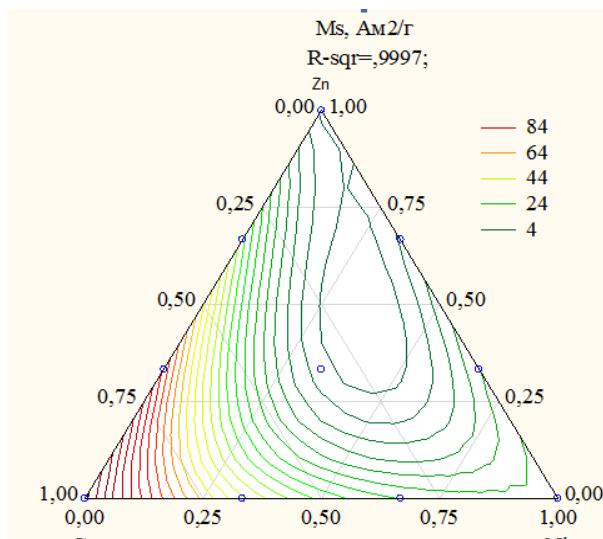


Рис. 1 – Залежність намагніченості насичення від складу

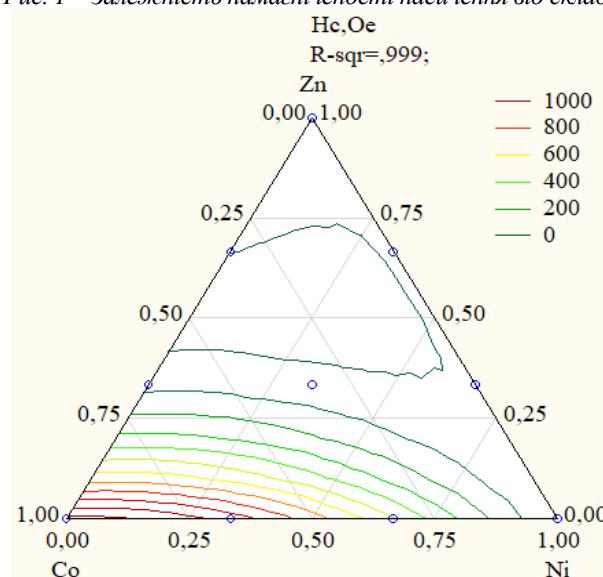


Рис. 2 – Залежність коерцитивної сили від складу

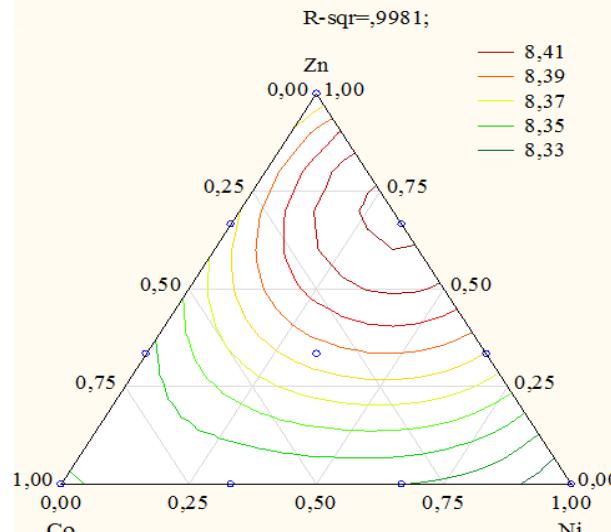


Рис. 3 – Залежність параметра кристалічної решітки від складу

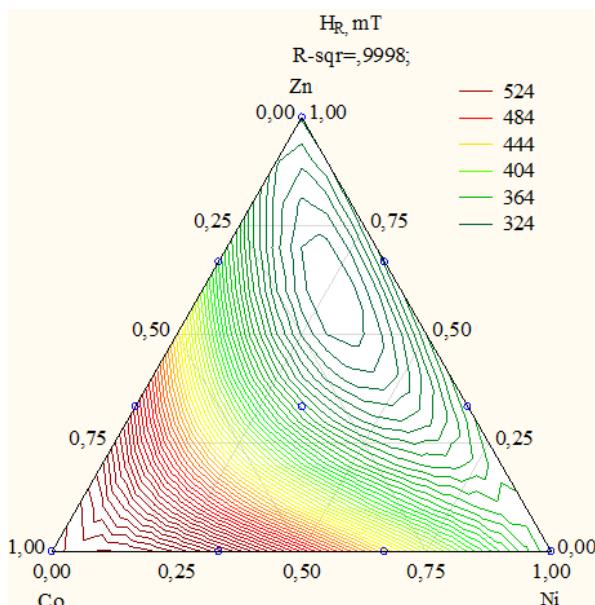


Рис. 4 – Залежність резонансного поля H_R від складу

Всі ЕПР спектри мають симетричний широкий резонансний сигнал, але їх ширина лінії (ΔH_{pp}) і резонансне магнітне поле (H_R) сильно відрізняються (табл. 2). З рис. 4 видно, що існує збільшення резонансного поля і зміна ширини лінії зі збільшенням мольної концентрації катіонів кобальту і нікелю. Видно, що ΔH_{pp} є вузькою, інтенсивністю піків більше для більш високої концентрації Zn. Спектр зразка фериту кобальту показує досить широкий сигнал ($\Delta H_{pp} = 398,7$ мТ).

Висновок

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень синтезовано ряд ферітів системи $\text{NiO}-\text{CoO}-\text{ZnO}$ з використанням контактної низькотемпературної нерівноважної плазми. Симплексним методом визначено ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивну силу. Встановлено, що низькі значення намагніченості спостерігаються для Ni-Zn ферітів і високі для всього ряду Co-Zn, Co-Ni ферітів. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах.

Отримані математичні моделі дають можливість регулювати значення намагніченості насичення і коерцитивної сили змінюючи склад ферітів.

Список літератури

- Sugimoto, M.** The past, present, and future of ferrites / **M. Sugimoto** // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1999. – Vol. 82. – № 2. – P. 269-280. – doi: 10.1111/j.1551-2916.1999.tb20058.x.
- Thanigai, Arul K. et al.** Novel polyvinyl alcohol polymer based nanostructure with ferrites co-doped with nickel and cobalt ions for magneto-sensor application / **Arul K. Thanigai et al.** // *Polymer International*. – 2016. – Vol. 65. – № 12. – P. 1482-1485. – doi: 10.1002/pi.5242.
- Ren, B. et al.** Ferrites as Photocatalysts for Water Splitting and Degradation of Contaminants. *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, American Chemical Society, 2016, 79-112, doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
- Ibrahim, I. Ali, I. O., Salama, Vol. M., Bahgat, A. A., Mohamed, M. M.** Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite (MFe_2O_4 , $\text{M} = \text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}$) nanocrystals prepared by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction / **I. Ibrahim, I. O. Ali, Vol. M. Salama, A. A. Bahgat, M. M. Mohamed** // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2016. – № 181. – P. 389-402. – doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.
- Ferreira, T. A. S.** Structural and morphological characterization of FeCo_2O_4 and CoFe_2O_4 spinels prepared by a coprecipitation method / **T. A. Ferreira et al.** // *Solid State Sciences*. – 2003. – Vol. 5. – № 2. – P. 383-392. – doi: 10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
- Deng, Y.** Hematite mesocrystals templated by hydrolyzed and aminolized glycidyl methacrylate, and their application in photocatalytic Fenton reaction / **Y. Deng et al.** // *CrystEngComm*. – 2019. – № 21. – № 10. – P. 1579-1586. – doi: 10.1039/C8CE01631C.
- Melo, R.** Hydrothermal synthesis of nickel doped cobalt ferrite nanoparticles: optical and magnetic properties / **R. Melo, P. Banerjee, A. Franco** // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2018. – № 18. – P. 1-11. – doi: 10.1007/s10854-018-9602-2.
- Frolova, L. A.** Investigation of conditions for ultrasound-assisted preparation of nickel ferrite / **L. A. Frolova, A. A. Pivovarov** // *High Energy Chemistry*. – 2015. – Vol. 49.1. – P. 10-15. – doi: 10.1134/S001814391501004X.
- Manikandan, A.** Synthesis, optical and magnetic properties of pure and Co-doped ZnFe_2O_4 nanoparticles by microwave combustion method / **A. Manikandan et al.** // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. – Vol. 349. – P. 249-258. – doi: 10.1016/j.jmmm.2013.09.013.
- Frolova, L. A.** Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the $\text{Fe}^{2+}-\text{Ni}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{OH}^-$ system / **L. A. Frolova et al.** // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 87.8. – P. 1054-1059. – doi: 10.1134/S1070427214080084.
- Frolova, L. A.** The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ Spinels / **L. A. Frolova, M. P. Derhachov** // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – Vol. 12. – № 1. – P. 505. – doi: 10.1186/s11671-017-2268-5.

References (transliterated)

- Sugimoto, M.** The past, present, and future of ferrites. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, **82**, 2, 269-280, doi: 10.1111/j.1551-2916.1999.tb20058.x.
- Thanigai, Arul K. et al.** Novel polyvinyl alcohol polymer based nanostructure with ferrites co-doped with nickel and cobalt ions for magneto-sensor application. *Polymer International*, 2016, **65**, 12, 1482-1485, doi: 10.1002/pi.5242.
- Ren, B. et al.** Ferrites as Photocatalysts for Water Splitting and Degradation of Contaminants. *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, American Chemical Society, 2016, 79-112, doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
- Ibrahim, I. Ali, I. O., Salama, Vol. M., Bahgat, A. A., Mohamed, M. M.** Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite (MFe_2O_4 , $\text{M} = \text{Zn}, \text{Co}, \text{Mn}$) nanocrystals prepared by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction / **I. Ibrahim, I. O. Ali, Vol. M. Salama, A. A. Bahgat, M. M. Mohamed** // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2016. – № 181. – P. 389-402. – doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.

- engineered by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, **181**, 389-402, doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.
5. Ferreira, T. A. S. et al. Structural and morphological characterization of FeCo₂O₄ and CoFe₂O₄ spinels prepared by a coprecipitation method. *Solid State Sciences*, 2003, **5**, 2, 383-392, doi: 10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
6. Deng, Y. et al. Hematite mesocrystals templated by hydrolyzed and aminolyzed glycidyl methacrylate, and their application in photocatalytic Fenton reaction. *CrystEngComm*, 2019, **21**, 10, 1579-1586, doi: 10.1039/C8CE01631C.
7. Melo, R. S., P. Banerjee, A. Franco. Hydrothermal synthesis of nickel doped cobalt ferrite nanoparticles: optical and magnetic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, **18**, 1-11, doi: 10.1007/s10854-018-9602-2.
8. Frolova, L. A., Pivovarov, A. A. Investigation of conditions for ultrasound-assisted preparation of nickel ferrite. *High Energy Chemistry*, 2015, **49**, 1, 10-15, doi: 10.1134/S001814391501004X.
9. Manikandan, A. et al. Synthesis, optical and magnetic properties of pure and Co-doped ZnFe₂O₄ nanoparticles by microwave combustion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, **349**, 249-258, doi: 10.1016/j.jmmm.2013.09.013.
10. Frolova, L. A. et al. Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the Fe²⁺-Ni²⁺-SO₄²⁻-OH⁻ system. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, **87**, 8, 1054-1059, doi: 10.1134/S1070427214080084.
11. Frolova, L. A., Derhachov, M. P. The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of Mn_xFe_{3-x}O₄ Spinels. *Nanoscale research letters*, 2017, **12**, 1, 505, doi: 10.1186/s11671-017-2268-5.

Сведения об авторах (About authors)

Фролова Лілія Анатоліївна - кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», кафедра технологій неорганічних речовин та екології, м. Дніпро, Україна; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

Liliya Frolova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Affiliation, Department of inorganic substances technology and ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Фролова, Л. А. Дослідження магнітних властивостей феритів в системі NiO-CoO-ZnO / Л. А. Фролова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 81-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

Please cite this article as:

Frolova, L. Research of the magnetic properties of feerites in the NiO-CoO-ZnO system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 81-85, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Фролова, Л. А. Исследование магнитных свойств ферритов в системе NiO-CoO-ZnO / Л. А. Фролова // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 81-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

АННОТАЦИЯ Оксидные системы, содержащие катионы переходных металлов обладают важными технологическими свойствами. Так, например, ферриты кобальта, никеля, марганца, цинка используют в магнитных, электрических материалах, как катализаторы ряда реакций. Технологические схемы получения таких соединений требуют использования высокотемпературной термообработки и сложного оборудования. Применение гидрофазных химических методов синтеза является основой получения ферритов переходных материалов с заданным комплексом свойств. Характерной тенденцией последнего времени является разработка технологий получения именно нанодисперсных ферритов. В работе изучена зависимость магнитных характеристик ферритов в системе CoO-NiO-ZnO симплексным методом. Ферриты Ni-Zn, Co-Zn, Co-Ni синтезировали в виде наночастиц с использованием контактной неравновесной низкотемпературной плазмы. Кристаллическая микроструктура образцов была выяснена с использованием рентгеноструктурного и рентгенофазового методов. Установлено, что для шпинельной ферритов, в частности, выбор двухвалентного катиона непосредственно определяет их магнитную поведение. Определен эффект взаимного влияния содержания различных катионов на намагниченность насыщения и коэрцитивную силу симплексным методом. Магнитные исследования с использованием вибрационного магнетометра показали, что при данных условиях синтеза наблюдаются низкие значения намагниченности для Ni-Zn ферритов и высокие для всего ряда Co-Zn, Co-Ni ферритов. Увеличение содержания катионов кобальта приводит к увеличению коэрцитивной силы во всех составах. Также было выявлено положительное влияние катионов никеля на значение намагниченности насыщения ферритов на стороне треугольника Ni-Zn и противоположное по стороне Ni-Co. Спектры ЭПР показывают, что значение резонансного поля и ширины линии соответствует значению магнитного насыщения.

Ключевые слова: феррит кобальта; феррит цинка; феррит никеля; симплексный метод феррит кобальта; магнитная наночастицы; рентгеновская дифракция

Поступила (received) 01.10.2019

УДК 621.315.615:621.319.4

doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13

ВИБІР ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО КОНДЕНСАТОРА, ЩО ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В РЕЖИМІ З ВИСОКОЮ ЧАСТОТОЮ ПРОХОДЖЕННЯ ЗАРЯДІВ-РОЗРЯДІВ

В. І. ГУНЬКО*, О. Я. ДМИТРИШИН, А. П. МАЛЮШЕВСЬКА, С. О. ТОПОРОВ

Відділ високовольтних імпульсних конденсаторів, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, УКРАЇНА
**e-mail: dphc@iipt.com.ua*

АНОТАЦІЯ Робота присвячена вибору діелектричної системи (твердий робочий діелектрик - рідкий діелектрик, що просочує) для високовольтного імпульсного конденсатора, який експлуатується в режимі з високою частотою проходження зарядів-розврядів. Вибір оптимальної системи для такого конденсатора потребує проведення аналітичного огляду діелектричних матеріалів, що застосовуються у високовольтному конденсаторобудуванні. Так як високовольтний імпульсний конденсатор призначений для експлуатації з високою частотою проходження зарядів-розврядів, то огляд виконувався виключно по неполярних діелектричним матеріалам, які в порівнянні з полярними мають більш ніж на порядок меншими діелектричними втратами, і одночасно високою електричною міцністю. В якості твердого робочого діелектрика однозначно обраний діелектрик на основі шарів тільки полімерної плівки. З полімерних плівок для робочого діелектрика обрана поліпропіленова плівка, також розглянуті її діелектричні характеристики в залежності від місяця і способу виробництва. У нашому випадку була обрана поліпропіленова плівка українського виробництва, яка за своїми електрофізичними характеристиками не поступається плівкам провідних країн-виробників. При виборі рідкого діелектрика, що просочує плівковий робочий діелектрик розглядалися неполярні діелектричні рідини, що мають малу кінематичну в'язкість. Розглянуто властивості малов'язких діелектричних рідин від провідних країн-виробників. Розглянуто характеристики рідких діелектриків на основі мінеральних масел, які тривалий час застосовуються в високовольтній техніці, проте горючість, неоднорідність характеристик, недостатньо висока електрична стійкість в електричному полі призвело до їх заміни на синтетичні рідини. Розглянуто властивості кремнійорганічних рідин (зокрема поліметилсілоксанов), синтетичних вуглеводнів (зокрема суміші моно- і дібензілтолуолов (JARILEC C101) і фенілксилетана (ФКЕ)). Проведена порівняльна оцінка їх діелектричних характеристик. На основі проведеного аналізу надано рекомендації щодо застосування діелектриків для діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, який призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розврядів.

Ключові слова: плівковий діелектрик; поліпропіленова плівка; діелектрична просочуюча рідина; частота проходження; високовольтний імпульсний конденсатор

SELECTION OF THE DIELECTRIC SYSTEM OF A HIGH-VOLTAGE PULSED CAPACITOR INTENDED FOR OPERATION IN THE MODE WITH A HIGH FREQUENCY OF CHARGE-DISCHARGE REPETITION

V. GUN'KO, A. DMITRISHIN, A. MALUSHAVSKAYA, S. TOPOROV

Department of high-voltage pulsed capacitor, Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine, Mykolaiv, UKRAINE

ABSTRACT The work is devoted to the selection of a dielectric system (solid working dielectric - liquid impregnating dielectric) for a high-voltage pulse capacitor, which is operated in a mode with a high repetition rate of charge-discharges. The choice of the optimal system for such a capacitor required an analytical review of dielectric materials used in high-voltage capacitor construction. Since a high-voltage pulse capacitor is designed for operation with a high repetition rate of charge-discharges, it was performed exclusively on non-polar dielectric materials, which have, compared to polar, more than order of magnitude lower dielectric losses and, at the same time, high electrical strength. As a solid working dielectric, a dielectric based on layers of only a polymer film is uniquely selected. A polypropylene film was selected from polymer films for the working dielectric, and its dielectric characteristics were also considered depending on the place and method of production. In our case, a polypropylene film of Ukrainian production was chosen, which in its electrophysical characteristics is not inferior to the films of leading manufacturing countries. When choosing a liquid impregnating dielectric for a film working dielectric, non-polar dielectric liquids with a low kinematic viscosity were considered. The properties of low-viscosity dielectric liquids from leading manufacturing countries are considered. The characteristics of liquid dielectrics based on mineral oils, which have been used for a long time in high-voltage technology, are considered, however, the combustibility, heterogeneity of characteristics, and insufficiently high electrical resistance in an electric field led to their replacement with synthetic liquids. The properties of organosilicon liquids (in particular polymethylsiloxanes), synthetic hydrocarbons (in particular, a mixture of mono- and dibenzyltoluenes (JARILEC C101) and phenyl-xylene ethane (PXE)) are considered. A comparative assessment of their dielectric characteristics is carried out. Based on the analysis, recommendations are given on the use of dielectrics for a dielectric system of a high-voltage pulse capacitor, which is designed for operation in a mode with a high repetition rate of charge-discharges.

Keywords: film dielectric; polypropylene film; dielectric impregnating fluid; repetition rate; high-voltage pulse capacitor

Вступ

В даний час Інститутом імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, проводяться

роботи по створенню високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для експлуатації в режимах з високою частотою проходження зарядів-розврядів до 100 Гц.

Проектування будь-якого конденсатора завжди починається з вибору його діелектричної системи. В той же час, поєднання заданих значень номінальної ємності конденсатора C_n , його робочої напруги U_p , частоти проходження зарядів-розрядів f при його експлуатації та температури навколошнього середовища t_0 вже зумовлюють використування лише декількох діелектриків з всього різноманіття діелектричних матеріалів.

Мета роботи

Проведення аналітичного огляду діелектричних матеріалів, що використовуються при створенні високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів.

Викладення основного матеріалу

Так як високовольтний імпульсний конденсатор, що створюється, призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів (до 100 Гц), то як основний елемент його діелектричної системи повинна бути обрана електроізоляційна полімерна плівка, що має високу електричну міцність і низькі діелектричні втрати [1].

Пріоритетною при створенні конденсаторів із плівковим робочим діелектриком, що працюють в високочастотному режимі, є поліпропіленова плівка, що відноситься до неполярних діелектриків [2].

Поліпропіленову плівку виготовляють з ізотактичного поліпропілену й завдяки поєднанню високої електричної міцності, низьких діелектричних втрат, малого вмісту слабких місць на одиницю площини, дешевизні та можливості широкої модифікації технологічних властивостей, виробництво такої плівки є широко розвинутим у світі [3]. Властивості плівки у великий мірі залежать від способу виготовлення – екструзією або видуванням. Способом видування виготовляється більш м'яка плівка і з більшим розкидом за товщиною, а способом екструзії – більш тонка, більш тверда та з меншим розкидом. У США застосовують спосіб видування, у Франції, Італії, Україні й Німеччині – спосіб екструзії, у Японії – обидва способи. Поверхня плівки може мати як природну, так і штучно додану однобічну або двосторонню шорсткість. Наявність шорсткості на поверхні плівки облегшує процес просочення конденсаторів, а також облегшує процес намотування секцій, знижуючи злипання шарів плівки. Рекомендований температурний діапазон експлуатації поліпропіленової плівки від мінус 60 °C до плюс 100 °C є доволі широким. Необхідно відзначити, що електрофізичні характеристики поліпропіленової плівки різних виробників відрізняються між собою незначно.

Крім того, проведені раніше в ІППТ НАН України експериментальні дослідження з оцінки довговічності застосовуваних у високовольтному конденсаторобудуванні полімерних плівок, а саме: поліпропіленової (італійського та українського виробництва), поліетиленової, поліімідної, полікарбонатної та поліетиленерефталатної, дозволили розглядати поліпропіленову плівку українського виробництва, як найбільш технологічно придатну та найбільш електрично міцну [4].

Таким чином, для створення високовольтного імпульсного конденсатора, що призначений для експлуатації з високою частотою проходження зарядів-розрядів, може бути обрана поліпропіленова плівка Tervakoski Film марки RER, ТУ У 25.2-25093118-001-2001 виробництва фірми ЗАТ СП „ТЕРИХЕМ-ЛУЦК”, Україна. Плівка характеризується електричною міцністю не менш 210 кВ/мм, відносною діелектричною проникністю ε (при 20 °C і частоті 10 Гц) – 2,2, тангенсом кута діелектричних втрат $tg\delta$ (при 20 °C і діапазоні частот від 50 Гц до 10⁶ Гц) – 2·10⁻⁴, максимальною температурою експлуатації плівки – 100 °C (триваля), 120 °C (короткочасна) [5].

У частині вибору рідкого просочуючого діелектрика однозначних рекомендацій не має. Просочуюча електроізоляційна рідина призначена для заповнення вільного простору між шарами робочого діелектрика конденсатора, підвищуючи його електричну міцність і величину відносної діелектричної проникності діелектричної системи в цілому, що у свою чергу позитивно позначається на питомих та експлуатаційних характеристиках. Вимоги, які пред'являють до рідких просочуючих діелектриків, дуже суперечливі. Рідини повинні характеризуватися високою електричною міцністю, мати одночасно високе значення відносної діелектричної проникності та низьке значення тангенса кута діелектричних втрат, малу в'язкість у діапазоні робочих температур конденсатора. Рідкий діелектрик повинен демонструвати стабільні характеристики в умовах впливу високої напруженості електричного поля, широкий діапазон робочих температур, бути негорючими та пожежобезпечним. Однак рідких діелектриків, що задовільняють одночасно всім цим вимогам, у природі не існує. Тому при виборі рідкого просочуючого діелектрика для конкретного високовольтного імпульсного конденсатора визначальними факторами є тип діелектричної системи конденсатора, умови та режим його експлуатації.

Раніше в ІППТ проводилися експериментальні дослідження щодо вибору типу просочуючої електроізоляційної рідини для різних комбінацій полімерного плівкового робочого діелектрика та оцінювалася його довговічність залежно від режимів експлуатації високовольтного імпульсного конденсатора [1,6]. У результаті цих досліджень було

отримано, що для якісного просочення пілікової діелектричної системи та забезпечення високих значень короткочасної та тривалої електричної міцності повинні бути задіяні малов'язкі неполярні діелектричні рідини.

В Україні при просоченні пілікових діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів знайшли широке застосування трансформаторні масла марок Т-1500 ДСТУ 982-80 і ГК ТУ 38-401-358-84 виробництва фірми „АРІАН”, Україна, які відносяться до мінеральних нафтових масел [1,8-11]. Електрофізичні та фізико-хімічні характеристики цих масел близькі, вони відрізняються один від одного головним чином походженням (родовищами нафти) та способами очищення. У європейських країнах для просочення діелектричних систем високовольтних електротехнічних пристрій рекомендуються трансформаторні масла марок Nytro 10 XN і Nytro 11 GX виробництва фірми „NYNAS”, Швеція, які є аналогами олив марок Т-1500 та ГК [12,13].

Конденсатори із просоченням високоочищеними (переочищеними) маслами, як показав досвід виробництва в ІППТ і на Дослідному заводі ІППТ, виходили з ладу частіше, ніж з тими, що містять великий відсоток природних антиокислювачів і компонентів, стійких до впливу електричного поля. Рідини з підвищеним вмістом ароматичних вуглеводнів мають підвищений окисну ѹ електричну стійкості, меншу склонність до виділення газів при впливі на них електричних розрядів і мають більшу здатність до газопоглинання. Ароматичні вуглеводні є необхідною складовою частиною електроізоляційних нафтових масел. Їх кількісний і структурний склад багато в чому визначає фізико-хімічні та електричні характеристики рідкого діелектрика. Повне видалення ароматичних вуглеводнів з масла в процесі очищення призводить до зниження його стійкості проти окислювання (особливо при підвищенні температурі). У той же час, наявність великої кількості ароматичних вуглеводнів, особливо поліциклічних, підвищує значення тангенсу кута діелектричних втрат. Тому для кожного типу масла підбирається оптимальне співвідношення наftenових та ароматичних вуглеводнів.

Сумісність із твердими електротехнічними матеріалами відіграє важому роль при виборі масла, як просочуючого діелектрика [14]. Сталь, олово, олов'яно-свинцевий сплав, нікель, хром, кадмій мало змінюються самі та слабко впливають на рідину під час термоокислювання старіння. Мідь та мідні сплави інтенсивно кородують, є активними каталізаторами окислювання та значно підвищують тангенс кута діелектричних втрат. Інтенсивність корозії підвищується з підвищенням температури окислювання та пов'язана з хімічним складом рідини. Тому у просочених нафтовим маслом високовольтних електротехнічних пристроях, які розраховані на тривалий термін служби без його заміни, всі мідні

струмовідні частини лудять, цинкують або нікелюють.

Колір трансформаторного масла зазвичай солов'яно-жовтий та характеризує глибину очищення – чим глибше очищення, тим світліше масло. Відносна діелектрична проникність у нафтових масел низька та дорівнює приблизно 2,2 при 20 °C, з ростом температури до 90 °C знижується в середньому на величину від 3 % до 4 %. При частоті 50 Гц тангенс кута діелектричних втрат масла практично визначається провідністю та залежить від ступеня його очищення. Зі збільшенням температури тангенс кута діелектричних втрат лінійно зростає. Для технічно чистого масла пробивна напруга в стандартному розряднику становить від 50 кВ до 60 кВ при 50 Гц і 120 кВ при впливі імпульсів [15]. Одним з істотних недоліків трансформаторних масел є те, що зниження температури експлуатації масел у межах від плюс 20 °C до мінус 5 °C, при змінній або постійній напрузі, призводить до зменшення короткочасної електричної міцності, а подальше зниження температури від мінус 5 °C до мінус 45 °C викликає вже її зростання. Це пояснюється різним агрегатним станом води у маслі, утворенням кристалів льоду та зміною в'язкості.

Через горючість, неоднорідність властивостей, яка обумовлена неоднорідністю складу, недостатньо високу стійкість в електричному полі (з урахуванням сучасних вимог до високовольтного обладнання), виснаження традиційних джерел нафти, придатних для виготовлення електроізоляційних масел, намітилася тенденція заміни нафтових масел синтетичними вуглеводнями [10].

При створенні деяких типів конденсаторів, зокрема високовольтних імпульсних для електрогидроімпульсних пристрій для збільшення дебіту нафтових і газових свердловин з розширенім діапазоном робочих температур експлуатації до 100 °C і вище, а також силових конденсаторів для електротранспорту вугільних шахт, де пред'являються підвищенні вимоги з пожежної безпеки застосованого обладнання, становлять інтерес кремнійорганічні просочуючі рідини [16,17].

Рідкі кремнійорганічні рідини нетоксичні, екологічно безпечні, мають високу термоокислювальну стабільність і експлуатаційну надійність.

З кремнійорганічних рідин – як просочувальних діелектриків високовольтних імпульсних конденсаторів – найбільш широке застосування отримали поліметилсілоксанові рідини [8]. В'язкість цих рідин може коливатися в широкому інтервалі від 1 сСт до $1 \cdot 10^3$ сСт залежно від молекулярної ваги. Залежно від в'язкості збільшується густина рідин, величина її становить від 0,96 г/см³ до 0,99 г/см³.

Провідне місце в області вітчизняного виробництва поліметилсілоксанових кремнійорганічних рідин займає Запорізьке державне

підприємство „Кремнійполімер”, [18]. Поліметилсілоксанові рідини прозорі, безбарвні, хімічно інертні, корозійно стійкі, гідрофобні, мають гарні діелектричні та демпфіруючі властивості та є поверхнево-активними речовинами. Температура застигання поліметилсілоксанових рідин нижче мінус 60 °C, тому вони можуть використовуватися при робочих температурах від мінус 50 °C до плюс 200 °C. Зі збільшенням в'язкості рідин нижня межа робочих температур знижається від мінус 50 °C до мінус 40 °C, разом з тим, зі зростанням в'язкості рідин збільшуються їх електрична міцність та питомий об'ємний електричний опір.

Однак у виробництві високовольтних імпульсних конденсаторів, які призначені для експлуатації у нормальнích кліматичних умовах та режимах з високою частотою проходження зарядів-розрядів, ці рідини не знайшли широкого застосування через свою незадовільну електричну міцність та низьку газостійкість [15].

Для просочення силових конденсаторів з робочим діелектриком на основі полімерних плівок широке застосування у світовій практиці високовольтного конденсаторобудування одержали такі синтетичні електроізоляційні рідини як JARILEC C101 виробництва фірми „Arkema”, Франція та фенілксилілетан (ФКЕ) виробництва фірми „Nippon Chemical Co”, Японія [16,19-22].

Діелектрична рідина JARILEC C101 являє собою суміш 75 % монобензілтолуолу і 25 % дібензілтолуолу. Рідина хімічно стабільна, має задовільну електричну міцність, стійка до перенапруг, має малу в'язкість і низьку температуру застигання, відноситься до класу помірно небезпечних речовин, екологічно сумісна. В ІПТ раніше проводилися експериментальні дослідження діелектричних рідин на основі суміші моно- і дібензілтолуолів і неодноразово надходили скарги від робочого персоналу на різкий запах цих рідин і симптоми алергії. Фірма „Arkema” признає той факт, що діелектрична рідина JARILEC C101 має сильний запах, який може негативно впливати на людей. Тому

цим виробником було створено діелектричну рідину JARILEC C101D, що є ароматизованим варіантом рідини JARILEC C101, де інтенсивність запаху знижена і стає задовільною [22].

Більш широке застосування, у порівнянні з JARILEC C101, для просочення плівкового діелектрика силових конденсаторів знайшов фенілксилілетан (ФКЕ) – синтетична вуглеводна ароматична речовина ряду діаріалкану [23]. Наприклад, Усть-Каменогорський конденсаторний завод, Казахстан виробляє силові конденсатори тільки із плівковим робочим діелектриком, просоченим фенілксилілетаном [24]. ФКЕ має найвищу газостійкість серед розглянутих синтетичних рідких діелектриків, стабільний та екологічно безпечний, стійкий до перенапруг, забезпечує зниження ймовірності виникнення часткових розрядів і має великий термін служби.

Раніше в ІПТ проводилися експериментальні дослідження тривалої електричної міцності різних діелектричних систем на основі полімерних плівок – полікарбонатної, поліетилентерефталатної і поліпропіленової [7]. У ролі просочуючих рідких діелектриків досліджувалися трансформаторне масло T-1500, ФКЕ, поліметилсілоксанові рідини ПМС-10 і ПМС-20. Метою досліджень був вибір оптимальних діелектричних систем на основі комбінацій полімерних плівок і діелектричних рідин для виготовлення надійного робочого діелектрика високовольтних імпульсних конденсаторів. Експериментальні дослідження показали, що тип просочувальної рідини впливає на тривалу електричну міцність досліджуваних діелектричних систем - в однакових умовах випробувань зразки на основі поліпропіленової плівки, що були просочені ФКЕ, характеризувалися більш високим значеннями короткочасної та тривалої електричної міцності в порівнянні з аналогічними зразками, просоченими трансформаторним маслом T-1500 та поліметилсілоксановими рідинами ПМС-10 та ПМС-20.

Таблиця 1 – Характеристики малов'язких неполярних діелектричних рідин

Найменування	Страна-виробник	Густина, г/см ³	В'язкість, сСт		tg δ (при 90 °C)	Електрична міцність, кВ/мм	Температура спалаху, °C
			при 20 °C	ε			
Трансформаторне масло T-1500	Україна	0,895	8,0 (50 °C)	2,2	0,005	30	135
Трансформаторне масло ГК			9,0 (50 °C)			32	135
Трансформаторне масло Nytro 10XN			8,0 (40 °C)			28	140
Трансформаторне масло Nytro 11GX			11,0 (40 °C)			20	135
Поліметилсілоксанова рідина: ПМС-10	Україна	0,960	10	2,6	0,003 (150 °C)	18	170
ПМС-20			20			18	200
ПМС-100			100			19	300
Фенілксилілетан	Японія	0,990	6,5	2,5	0,0003	31	148
JARILEC C101	Франція	1,010	6,5	2,66	0,004 (t=100 °C)	35	144

В [25] наведено результати експериментальних досліджень тривалої електричної міцності плівкових діелектриків, просочених нафтовими маслами, ФКЕ, JARILEC C101 та рідиною Миксофлекс 1000, виробництва фірми „Prodelec”, Франція. Було встановлено, що найбільшу електричну міцність має поліпропіленовий плівковий діелектрик, просочений ФКЕ, при цьому коефіцієнт варіації по електричній міцності діелектрика складає 2,4 %. За результатами експериментальних досліджень було зроблено висновок, що для просочення робочого діелектрика силових конденсаторів із поліпропіленовою плівкою найбільш перспективною є електроізоляційна рідина ФКЕ.

Основні характеристики розглянутих малов'язких неполярних діелектричних рідин, що отримали найбільш широке застосування для просочення плівкової ізоляції в сучасних високовольтних електротехнічних пристроях, представлено в табл. 1.

Висновки

Для просочення плівкового діелектрика високовольтного імпульсного конденсатора, що експлуатується у режимі з високою частотою проходження зарядів-роздрідів, найбільш доречно застосовувати фенілксилілатан.

Список літератури

- Гунько, В. И. Исследование конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов / В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, С. О. Топоров, Т. А. Фещук // Электронная обработка материалов. – 2012. – № 2. – С. 93-96
- Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
- Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого. в 3т., Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
- Малюшевська, А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А.П. Малюшевська, В.І. Гунько, С.О. Топоров // Електротехніка та електроенергетика. – 2017. - № 1. – С. 12-17.
- ТУ 25.2-25093118-001. Плівки поліпропіленові двовісноорієнтовані. Технічні умови. Введ. 2001-12-19. – Луцьк: Волинський державний центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2001. – 27 с.
- Гребенников, И. Ю. О повышении удельных характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов / И. Ю. Гребенников, В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, И. С. Швец // Электронная обработка материалов. – 2004. – №5. – С.70 -74.
- Высоковольтные бумажно-пленочные конденсаторы для повышения коэффициента мощности с экологически безопасными жидкостями (взамен трихлордифенила): отчёт о НИР / ВНТИЦ. – М., 1987. – 51 с. – № ГР 02860098598.
- Гунько, В. И. Исследования по созданию гаммы высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, И. А. Перекупка // Материалы XV Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2011. – С. 201-203.
- Рудаков, В. В. Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ» / В. В. Рудаков, Н. И. Бойко, В. Д. Беспалов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Электротехника и преобразовательная техника»: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 47 – 58.
- Рудаков, В. В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів / В. В. Рудаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 146-154.
- Гунько, В. И. Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, Л. И. Онищенко, С. О. Топоров, И. А. Перекупка // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 65-71.
- Базовые и трансформаторные масла Nynas. – URL: www.nynas.com.
- Область применения трансформаторных масел. – URL: http://www.sinopet.com/listco/en/products_service/lubricants/indu_lube/transformer_o/.
- Гунько, В. И. Исследование совместимости трансформаторного масла Т-1500 с конструктивными материалами / В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, С. О. Топоров, Т. А. Фещук // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 5. – С. 77-79.
- Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого. в 3т., Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386 с.
- Физическая энциклопедия. Жидкие диэлектрики. – URL: http://femto.com.ua/articles/part_1/1170.html.
- Виды жидких диэлектриков, свойства, область применения. – URL: <https://studopedia.org/8-90164.html>.
- Запорожское государственное предприятие «Кремнийполимер»: каталог. – URL: www.silic.com.ua.
- Пропитывающие диэлектрики. – URL: kvar.su/books/2/chap6.pdf.
- Синтетические жидкие диэлектрики. – URL: lib.kstu.kz:8300/tb/books/materialovedenie/theory/3.2.3.html.
- Синтетические жидкие диэлектрики. – URL: <http://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki/>.
- JARYLEC C101, the most efficient dielectric oil for HV capacitors and capacitive HV equipment's. – URL: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Jarylec-dielectric-fluids/2/>.
- Fofana, I. 50 Years in the Development of Insulating Liquids / I. Fofana // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, №5. – P. 13-25. – doi: 10.1109/MEI.2013.6585853.
- Усть-Каменогорский конденсаторный завод: сайт предприятия. – URL: <http://www.ukkz.com>.
- Галахова, Л. И. Электрические характеристики изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными жидкостями: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.12 «Техника высоких напряжений» / Л. И. Галахова. – URL: tehnosfera.com/view/454825/a#?page=1-21.

References (transliterated)

1. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishhenko, L. I., Toporov, S. O., Feshchuk, T. A.** Issledovanie konstruktij plenochnogo dielektrika dlya vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov [Investigation of film dielectric structures for high-voltage pulse capacitors]. *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2012, **2**, 93-96.
2. **Kuchinskij G.S., Nazarov N.I.** Silovye elektricheskie kondensatory [Electric Power Capacitors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 310.
3. Spravochnik po ehlekrotehnicheskim materialam [Handbook of electrical materials] under redaction **Yu. V. Koritskij**. Vol. 2 Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 464.
4. **Malushevska, A. P., Gun'ko, V. I., Toporov, S. O.** Dovgotryvala elektrychna mitsnist' polimernykh plivok pid dieyu elektrychnogo polya [Long-term dielectric strength polymer films under an electric field]. *Elektrotehnika ta elektroenergetyka [Electrical engineering and power engineering]*, 2017, **1**, 12-17.
5. TU U 25.2-25093118-001. Plivky polipropilenovi dvovisnoorientovani. Tekhnichni umovy [Biaxial oriented polypropylene films. Specifications]. Lutsk, 2001, 27.
6. **Grebennikov, I. Yu., Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishchenko, L. I., Shvets, I. S.** O povyshenii udel'nykh kharakteristik i resursa vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov [On increasing the specific characteristics and life-time of high-voltage pulse capacitors] *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2004, **5**, 70-74.
7. Vysokovol'tnye bumazhno-plenochnye kondensatory dlya povysheniya koefifiktsienta moshchnosti s ekologicheskimi bezopasnymi zhidkostyami (vzamen trikhlorofenila) [High voltage paper-film capacitors to increase the power factor with environmentally friendly liquids (instead of trichlorobiphenyl)]. Report of ALL-UNION SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION CENTER no. GP 02860098598. Moscow, 1987, 51.
8. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishchenko, L. I., Perekupka, I. A.** Issledovaniya po sozdaniyu gamma vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dielektrikom [Research on the creation of a range of high-voltage pulsed capacitors with a film dielectric]. *Materialy XV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara «Fizika impul'snyh razryadov v kondensirovannyh sredah» [Proc. of the XV Int. Conf. "Physics of Pulse Discharges in Condensed Media"]* Nikolaev, 2011, 201-203.
9. **Rudakov, V. V., Bojko, N. I., Bespalov, V. D.** Vysokovol'tnye impul'snye kondensatory razrabotki NIPKI «Molniya», NTU «KhPI» [High-voltage pulse capacitors developed by "Molniya" Scientific Research Institute, NTU "KhPI"]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series "Electrical Engineering and Conversion Technology"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2002, 47-58.
10. **Rudakov, V.V.** Stan ta tendentsiyi rozvytku vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatoriv [Status and tendencies of development of high-voltage pulse capacitors]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series "High voltage engineering and electrophysics"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2009, **39**, 146-154.
11. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Onishchenko, L. I., Toporov, S. O., Perekupka, I. A.** Razrabotka vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dielektrikom [Development of high-voltage pulse capacitors with film dielectric]. *Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series "High voltage engineering and electrophysics"]*. Kharkov, NTU "KhPI", 2012, 65-71.
12. Bazovye i transformatornye masla Nynas [Nynas. Base and transformer oils]. Available at: <http://www.nynas.com>.
13. Oblast' primeneniya transformatornykh masel [Scope of transformer oils]. Available at: http://www.sinopec.com/listco/en/products_service/lubricants/indu_lube/transformer_oil.
14. **Gun'ko, V. I., Dmitrishin, A. Ja., Toporov, S. O., Feshchuk, T. A.** Issledovanie sovmestnosti transformatornogo masla T-1500 s konstruktivnymi materialami [Study of the compatibility of transformer oil T-1500 with structural materials]. *Elektronnaya obrabotka materialov [Surface Engineering and Applied Electrochemistry]*, 2006, **5**, 77-79.
15. Spravochnik po ehlekrotehnicheskim materialam [Handbook of electrical materials] under redaction **Yu. V. Koritskij**. Vol. 1 Moscow, Energoatomizdat, 1986, 386.
16. Fizicheskaya entsiklopediya. ZHidkie dielektriki. [Physical Encyclopedia. Liquid dielectrics]. Available at: http://femto.com.ua/articles/part_1/1170.html.
17. Vidy zhidkikh dielektrikov, svojstva, oblast' primeneniya [Types of liquid dielectrics, properties, scope]. Available at: <http://studopedia.org/8-90164.html>.
18. Zaporozhskoe gosudarstvennoe predpriyatiye «Kremnijpolimer»: katalog [The State Enterprise "Kremnypolymer": catalog]. Available at: <http://www.silic.com.ua>.
19. Propityvayushchie dielektriki [Impregnating dielectrics]. Available at: <http://kvar.su/books/2/chap6.pdf>.
20. Sinteticheskie zhidkie dielektriki [Synthetic liquid dielectrics]. Available at: <http://lib.kstu.kz.8300/tb/books/materialovedenie/theory/3.2.3.html>.
21. Sinteticheskie zhidkie dielektriki [Synthetic liquid dielectrics]. Available at: <http://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki>.
22. JARYLEC C101, the most efficient dielectric oil for HV capacitors and capacitive HV equipment's. Available at: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Jarylec-dielectric-fluids/2/>.
23. **Fofana, I.** 50 Years in the Development of Insulating Liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2013, Vol. 29, **5**, 13-25, doi: 10.1109/MIEI.2013.6585853.
24. Ust'-Kamenogorskij kondensatornj zavod: sajt predpriyatiya. [Ust'-Kamenogorsk Capacitor Plant: official site]. Available at: <http://www.ukkz.com>.
25. **Galakhova, L. I.** Elektricheskie kharakteristiki izolyatsii silovykh kondensatorov promyshlennoj chasty s propitkoj ekologicheskimi bezopasnymi zhidkostyami [Electrical insulation characteristics of industrial-frequency power capacitors with impregnation with environmentally friendly liquids]. *Thesis of Ph. D. dissertation*. Available at: <http://teknosfera.com/view/454825/a#?page=1-21>.

Відомості про авторів (About authors)

Гунько Віктор Іванович – зав. сектором, ІППТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-1055-6304; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Viktor Gun'ko – head of sector, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1055-6304; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Дмитрішин Олексій Ярославович – молодший науковий співробітник, ІППТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-2420-9223; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Aleksey Dmitrishin – junior research assistant, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2420-9223; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Малюшевська Антоніна Павлівна – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, ІППТ НАН України, м. Миколаїв, Україна; ORCID: 0000-0003-0703-6105; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Antonina Malushevskaya – senior research assistant, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0703-6105; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Топоров Сергій Олегович – провідний інженер, ІППТ НАН України, м. Миколаїв; ORCID: 0000-0002-5188-7380; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Sergey Toporov – lead engineer, IPPT NAS of Ukraine, Mykolaiv; ORCID: 0000-0002-5188-7380; e-mail: dphc@iupt.com.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гунько, В. І. Вибір діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, що призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів / **В. І. Гунько, О. Я. Дмитрішин, А.П. Малюшевська, С. О. Топоров** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 86–92. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

Please cite this article as:

Gun'ko, V. I. , Dmitrishin, A. Ja. , Malushavskaya, A.P. , Toporov, S. O. Selection of the dielectric system of a high-voltage pulsed capacitor intended for operation in the mode with a high frequency of charge-discharge repetition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 2, 86–92, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гунько, В. И. Выбор диэлектрической системы высоковольтного импульсного конденсатора предназначенного для эксплуатации в режиме с высокой частотой следования зарядов-разрядов / **В. И. Гунько, А. Я. Дмитришин, А.П. Малюшевская, С. О. Топоров** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 86–92. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.13.

АННОТАЦІЯ Робота посвящена вибору диэлектрическої системи (твердый рабочий диэлектрик – жидкость пропитывающая диэлектрик) для высоковольтного импульсного конденсатора, который эксплуатируется в режиме с высокой частотой следования зарядов-разрядов. Выбор оптимальной системы для такого конденсатора потребовал проведения аналитического обзора применяемых в высоковольтном конденсаторостроении диэлектрических материалов. Так как высоковольтный импульсный конденсатор предназначен для эксплуатации с высокой частотой следования зарядов-разрядов, то обзор выполнялся исключительно по неполярным диэлектрическим материалам, обладающим по сравнению с полярными более чем на порядок меньшими диэлектрическими потерями, и одновременно высокой электрической прочностью. В качестве твердого рабочего диэлектрика однозначно выбран диэлектрик на основе слоев только полимерной пленки. Из полимерных пленок для рабочего диэлектрика выбрана полипропиленовая пленка, также рассмотрены ее диэлектрические характеристики в зависимости от места и способа производства. В нашем случае была выбрана полипропиленовая пленка украинского производства, которая по своим электрофизическим характеристикам не уступает пленкам ведущих стран-производителей. При выборе жидкого пропитывающего диэлектрика для пленочного рабочего диэлектрика рассматривались неполярные диэлектрические жидкости обладающие малой кинематической вязкостью. Рассмотрены свойства маловязких диэлектрических жидкостей от ведущих стран-производителей. Рассмотрены характеристики жидких диэлектриков на основе минеральных масел, длительно применяемых в высоковольтной технике, однако горючесть, неоднородность характеристик, недостаточно высокая электрическая стойкость в электрическом поле привело к их замене на синтетические жидкости. Рассмотрены свойства кремнийорганических жидкостей (в частности полиметилсилоxанов), синтетических углеводородов (в частности смеси моно- и дибензилтолуолов (JARILEC C101) и фенилксилэтиана (ФКЭ)). Проведена сравнительная оценка их диэлектрических характеристик. На основе проведенного анализа даны рекомендации по применению диэлектриков для диэлектрическої системи высоковольтного импульсного конденсатора, который предназначен для эксплуатации в режиме с высокой частотой следования зарядов-разрядов.

Ключові слова: пленочный диэлектрик; полипропиленовая пленка; диэлектрическая пропитывающая жидкость; частота следования; высоковольтный импульсный конденсатор

Поступила (received) 27.09.2019

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Василів О. Б., Тітлов О. С., Ліпін А. П.</i> Дослідження режимів роботи газопроводів на ділянці Тарутине – Орлівка	3
<i>Вербицький Є. В.</i> Спектр напруги ізольованого інвертора з двополярною модуляцією	10
<i>Кіпко О. Е., Гого В. Б., Чепіга Д. А., Сімонова Ю. І., Подкопаєв Є. С., Бойченко Г. Е.</i> Закономірності впливу закладних масивів на напруженій стан бічних порід у відкотних штреках	17
<i>Лухтура Ф. І., Медведєва М. В.</i> Про ефективність імпульсної подачі робочого середовища для покриття добового графіка навантажень насосної станції	25
<i>Лухтура Ф. І., Циганов В. І.</i> Про застосування циклічного режиму підключення акумуляторів теплоти у системах тепlopостачання	35
<i>Ольховський І. П., Фісун О. І., Фурсов А. М.</i> Твердотільний генератор КХЧ діапазону з підвищеною довготривалою стабільністю частоти	43

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Єгорова І. М., Кочура Л. О.</i> Розробка навчальної гри «WEB-технології»	49
<i>Хребет М. О., Кодола Г. М., Сербулова І. В.</i> Про процедурну генерацію тривимірних віртуальних просторів	54

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Коган А. Б., Поливанов Є. А., Гончаренко І. П., Супруненко К. Є.</i> Збагачення птеростильбеном сухого напівфабрикату для мафінів швидкого приготування	61
<i>Лухтура Ф. І.</i> Про екологію навколо промислових районів м. Маріуполя	67
<i>Степанова Т. М., Кондратюк Н. В., Хайдзюн Н., Супруненко К. Е.</i> Перспективи використання культивованих грибів у технології ковбасних виробів	75
<i>Фролова Л. А.</i> Дослідження магнітних властивостей ферітів в системі NiO-CoO-ZnO	81

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛІСКАВКОЗАХИСТ

<i>Гунько В. І., Дмитрішин О. Я., Малюшевська А. П., Топоров С. О.</i> Вибір діелектричної системи високовольтного імпульсного конденсатора, що призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів	86
---	----

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Vasyliv O., Titlov A., Lipin A.</i> Investigation of gas pipeline operating regimes at Tarutyne - Orlivka section	3
<i>Verbytskyi I.</i> Voltage spectrum of an isolated inverter with bipolar pulse frequency modulataion	10
<i>Kipko O., Gogo V., Chepiga D., Simonova Y., Podkopayev Y., Boichenko H.</i> Regularities of the influence of laying arrays on the stressed state of the lateral rocks in the rolling shtres	17
<i>Lukhtura F., Medvedieva M.</i> About efficiency of pulse feeding of the working environment for covering the daily schedule of loads of a pumping station	25
<i>Lukhtura F., Tsiganov V.</i> On application of the cycle mode of connecting heat batteries in heat supply systems	35
<i>Olkhovskiy I., Fisun A., Fursov A.</i> Solid state generator of EHF range with increased long-term frequency stability	43

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

<i>Iegorova I., Kochura L.</i> Development of educational game “WEB technologies”	49
<i>Khrebet M., Kodola G., Serbulova I.</i> About three-dimensional procedure virtual spaces	54

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

<i>Kogan A., Polyvanov Y., Honcharenko I., Suprunenko E.</i> Pterostilbene enrichment of dry convenience food for instant muffins	61
<i>Lukhtura F.</i> About ecology around industrial areas of Mariupol	67

Stepanova T., Kondratjuk N., Haijuan N., Suprunenko K. Prospects of cultivated mushrooms use in technology of sausages 75

Frolova L. Research of the magnetic properties of ferrites in the NiO -CoO-ZnO system 81

ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION

Gun'ko V., Dmitrishin A., Malushavskaya A., Toporov S. Selection of the dielectric system of a high-voltage pulsed capacitor intended for operation in the mode with a high frequency of charge-discharge repetition 86

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ". СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧASНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Збірник наукових праць

№ 2' 2019

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Україна

С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ». Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmt@gmail.com

Підп. до друку «03» листопада 2019 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,0. Облік.вид.арк. 8,75.

Тираж 50 прим. Зам. № 64. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
