

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**

№ 1' 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2019

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

No. 1' 2019

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

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. — № 1. — 129 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 edition 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 каталозі 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:

Авдєєва О. П., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вехов Є. О., Мерилендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Клепиков 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

Шестопапов 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. O., 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

Melezhik 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

Tomashevskiy 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 Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 27 вересня 2019 р.

УДК 622.276

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.01

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖПРОМИСЛОВИХ ГАЗОПРОВОДІВ

В. Б. ВОЛОВЕЦЬКИЙ*, О. М. ЩИРБА

Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: vvb11@ukr.net

АНОТАЦІЯ Проаналізовано наявний стан двох міжпромислових газопроводів: одного від установки попереднього підготовки газу (УППГ) Наріжнрянського нафтогазоконденсатного родовища (НГКР) до установки комплексного підготовки газу-2 (УКПГ-2) Юліївського НГКР та другого – від УКПГ-1 Скворцівського НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР. У різні періоди року визначено гідравлічну ефективність міжпромислових газопроводів, яка перебуває в широкому діапазоні: від 75 % до 98 % на одному і від 69 % до 96 % на другому. Досліджено режими роботи міжпромислових газопроводів. Визначено об'єм забруднень на промислах за допомогою розрахунків. Проведено промислові дослідження з вимірювання об'єму забруднень, які транспортують разом із газом, на вимірювальних лініях УКПГ-2 у сепараторах та розділювачах. Встановлено, що об'єм забруднень, визначений за результатами проведених експериментальних досліджень, є більший за розрахункові значення. Сформульовано основні чинники, що негативно впливають на гідравлічну ефективність газопроводу. Контролювання наведених основних чинників дасть змогу не допустити зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності та зменшення об'єму транспортованого газу, а також забезпечити досягнення планових показників з видобутку. Встановлено основні причини зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів у зв'язку із накопиченням рідинних забруднень у внутрішній порожнині та гідратуванням. Запропоновано шляхи розв'язання цих проблем, які впровадили, а також застосовують на виробництві у теперішній час. Зокрема, закачують розчин ПАВ за допомогою пересувного насосного агрегату, створюють швидкісний газовий потік для винесення накопиченої рідини із внутрішньої порожнини міжпромислових газопроводів на УКПГ-2 Юліївського НГКР та подають метанол за допомогою наявних насосів із УППГ Наріжнрянського НГКР та УКПГ-1 Скворцівського НГКР. Автори запропонували низку заходів для запобігання аваріям та відмова, які забезпечать надійну експлуатацію міжпромислових газопроводів. Системність проведених досліджень дасть змогу оцінити можливість виникнення ускладнень через накопичення рідини та відкладання гідратів.

Ключові слова: свердловина; газ; міжпромисловий газопровід; накопичення рідини; гідратування; гідравлічна ефективність

INVESTIGATION OF THE HYDRAULIC EFFICIENCY OF GATHERING GAS PIPELINES

V. VOLOVETSKYI*, O. SHCHYRBA

Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The current state of two gathering gas pipelines was analyzed in the article: the first – from the gas gathering station (GGS) of the Narizhnianske oil and gas condensate field (OGCF) to the complex gas treatment unit-2 (CGTU-2) of the Yuliivske OGCF; the second – from the CGTU-1 of the Skvortsivske OGCF to the CGTU-2 of the Yuliivske OGCF. At different times of the year the hydraulic efficiency of gathering gas pipelines was determined, which was in a wide range from 75 % to 98 % on the first, and from 69 % to 96 % on the second gathering gas pipeline respectively. The operating modes of gathering gas pipelines were studied. The volume of contamination in the fields was determined using calculations. The industrial research to measure the volume of contamination, transported together with gas on the CGTU-2 measuring lines, was performed in separators and segregators. It was established that the volume of contamination, determined based on the results of experimental investigations, was higher than the calculated value. The main factors that negatively influence the hydraulic efficiency of gas pipelines were defined. The monitoring of these main factors will prevent the reduction of the hydraulic efficiency coefficient and decrease in the volume of transported gas, it will also help to achieve the planned production figures. The authors determined the main reasons for the reduction in the hydraulic efficiency of gathering gas pipelines resulting from the accumulation of liquid contaminants in the inner cavity and hydrates formation. The proposed solutions to these problems were introduced and are still used in production. In particular, a surfactant solution is fed using a mobile pumping unit, a high-speed gas stream is created to remove the accumulated liquid from the internal cavity of field gas pipelines operating with the CGTU-2 of the Yuliivske OGCF and methanol is supplied using the available pumps from the GGS of the Narizhnianske OGCF and CGTU-1 of the Skvortsivske OGCF. The authors proposed a series of measures to prevent the emergencies and failures and ensure the reliable operation of gathering gas pipelines. The consistency of performed investigations will help to estimate the occurrence probability of complications caused by the accumulation of liquid and hydrates formation.

Keywords: well; gas; gathering gas pipeline; liquid accumulation; hydrates formation; hydraulic efficiency

Постановка проблеми у загальному вигляді

Під час розроблення газоконденсатних родовищ на виснаження у свердловинах відбувається поступове зниження пластових тисків та дебітів.

Через це свердловини можуть експлуатуватися на таких режимах, за яких наявний дебіт наближається або менший від мінімально-необхідного, що забезпечує стабільну роботу свердловин. Отже, за

умови зниження швидкості газового потоку менше граничного значення спостерігають накопичення рідини як на вибої свердловини, так і у шлейфі. Це негативно впливає на забезпечення стабільного технологічного режиму експлуатації свердловин та на рівень видобутку вуглеводнів.

Окрім цього, експлуатування свердловин за умови поступового зниження робочих тисків має негативний вплив на забезпечення процесу низькотемпературної сепарації, який застосовують для промислового підготовки газу на багатьох родовищах. Унаслідок цього може відбуватися погіршення ефективності процесу підготовки газу через зниження робочих тисків, а також стає неможливим забезпечити оптимальні температурні режими низькотемпературної сепарації. Важливо зауважити, що в разі зниження робочих тисків, спостерігають зазвичай зміну продуктивності свердловини по газу і рідині, що може погіршити ефективну роботу сепараційного обладнання через змінення діапазону навантажень за газовою та рідинною фазами. Через це під час транспортування вуглеводневої сировини від однієї установки підготовки газу до іншої у міжпромислових газопроводах виникають ускладнення, пов'язані з накопиченням рідини.

Актуальними залишаються питання очищення внутрішньої порожнини міжпромислових газопроводів від забруднень, основними з яких є рідинна фаза (вода та вуглеводневий конденсат), що потрапляють унаслідок механічного винесення разом із газом із сепараторів на установках підготовки газу (УПГ). Рідина утворюється також за сприятливих термодинамічних умов унаслідок конденсування під час руху газу газопроводом. Важливим чинником, що впливає на накопичення рідини, є відсутність швидкісного режиму руху газового потоку. Унаслідок накопичення рідини у внутрішній порожнині газопроводів відбувається збільшення гідравлічного опору окремих ділянок, що є причиною збільшення додаткових втрат тиску.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні проблему очищення газопроводів від води, вуглеводневого конденсату, механічних домішок найчастіше розв'язують за допомогою:

- пристроїв постійної дії (дрипи, розширювальні камери тощо);
- пристроїв періодичної дії (очищувальних поршнів, йоршів тощо);
- переведення газопроводу в режим самоочищення (продування газопроводу).

На газопроводах з профілем траси як з рівномірно прохідними ділянками, так і з наявністю багатьох місцевих опорів (трійники, відводи, розширення, звуження тощо) та понижених ділянок на практиці застосовують пристрої постійної дії. Для цього встановлюють різні конструкції дрипів,

розширювальних камер, уловлювачів, дренажних трубок тощо.

Широкого вжитку набув метод очищення газопроводів очищувальними пристроями. У порівнянні з іншими методами він має такі переваги: простота, значна ефективність та можливість автоматизувати процес [1]. Під час застосування цього методу є й певні ускладнення, що полягають у швидкому зношуванні робочих вузлів, можливості виникнення гідравлічних ударів і застрягання очищувального пристрою в трубі, а також у тому, що реалізування цього методу можливе тільки в газопроводах з рівнопрохідною арматурою та плавними переходами. Ураховуючи те, що міжпромислові газопроводи це непрямолінійні ділянки та вони мають значну кількість місцевих опорів (засувки, трійники, відводи, розширення, звуження тощо), висхідні та низхідні ділянки, існує небезпека застрягання очищувального пристрою. Тому такий метод для очищення міжпромислових газопроводів застосовувати недоцільно, адже для його використання потрібні певні умови [2].

Простим і доступним методом очищення газопроводів вважають продування зі зниженням тиску через відкритий переріз труби на амбар у атмосферу. Цей метод можна використовувати на газопроводах будь-якого діаметру. Однак у цього методу є недоліки: втрати газу та забруднення довкілля. Через це на практиці застосовують продування зі зниженням тиску – переведенням газопроводу на менший вхідний тиск, що забезпечує збільшення швидкості газового потоку на певний період часу.

У роботі [3] проаналізовано наявний стан міжпромислового газопроводу, яким газ із УППГ Наріжниського ГКР надходить на УКПГ-2 Юліївського НГКР. Проведено розрахунки із визначення гідравлічної ефективності міжпромислового газопроводу: за формулою (1) вона становила 0,81, а за формулою (2) – 0,96. Визначено об'єм забруднень у міжпромисловому газопроводі за формулою УкрНДгазу, який складає 3,3 м³ рідини з використанням формули (1) та 0,7 м³ з використанням формули (2). Результати розрахунків об'єму забруднень є наближеними, оскільки на практиці вдалося вилучити рідину з міжпромислового газопроводу на вимірювальну лінію УКПГ-2, зокрема у сепаратор та розділювач і її об'єм становив 3,5 м³. Отже, об'єм забруднень у міжпромисловому газопроводі, визначений розрахунковим та експериментальним шляхом, відрізняється, а різниця становить близько 6%. Аналізування причин утворення рідинних забруднень у порожнині міжпромислового газопроводу свідчить про можливість їх появи внаслідок: механічного крапельного винесення рідини із сепаратора ГС-1, конденсування рідини з газового потоку за сприятливих термодинамічних умов трасою міжпромислового газопроводу. Також

можливе залпове викидання рідини із сепаратора ГС-1 у міжпромисловий газопровід. Для забезпечення надійної роботи міжпромислового газопроводу запропоновано: послідовно під'єднати два сепаратори: основний ГС-1 та дослідний ГС-2, періодично закачувати розчин ПАР та за результатами досліджень обрати оптимальний режим для створення високошвидкісного потоку газу і винесення рідини з внутрішньої порожнини на УКПГ-2 Юліївського НГКР.

У роботі [4] проаналізовано стан міжпромислового газопроводу, яким газ із УКПГ-1 Сквицького НГКР транспортують на УКПГ-2 Юліївського НГКР. Проведено розрахунки із визначення швидкості газового потоку, що становила 5,9 м/с та 5,2 м/с, а також гідравлічної ефективності міжпромислового газопроводу – 0,89 та 0,71 відповідно за умов стабільної роботи та виникнення ускладнень. Основними ускладненнями в роботі міжпромислового газопроводу є накопичення рідини та гідратуутворення. Рідинні забруднення у внутрішній порожнині утворюються внаслідок механічного крапельного винесення рідини із сепараційного обладнання першого ступеня, конденсування рідини з газового потоку трасою, зниження швидкості газового потоку. За результатами досліджень встановлено, що найефективнішим методом очищення внутрішньої порожнини є створення високошвидкісного потоку газу для винесення рідини. Для запобігання відкладанню гідратів запропоновано подавання метанолу у міжпромисловий газопровід за допомогою насосів із технологічної установки УКПГ-1 Сквицького НГКР. Раціональним методом боротьби з гідратуутворенням є періодичне закачування інгібітору гідратуутворення за допомогою пересувного насосного агрегату різними способами.

З огляду на вище викладене для встановлення основних причин зниження гідравлічної ефективності доцільно дослідити її для двох міжпромислових газопроводів: одного від УППГ Наріжниського НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР, а другого від УКПГ-1 Сквицького НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР.

Для розв'язання проблеми очищення міжпромислових газопроводів треба з'ясувати причини надходження рідини, визначити її кількість. Це дасть змогу контролювати будь-яке зміння робочих параметрів під час експлуатування та своєчасно вживати заходи з очищення газопроводів. Від якості очищення внутрішньої порожнини газопроводів залежить їхня гідравлічна ефективність. Тому потрібно прагнути досягнути значення коефіцієнта гідравлічної ефективності газопроводу після очищення близько 1,0 (100 %). З практичного досвіду відомо, щоб досягнути високого значення коефіцієнта гідравлічної ефективності треба декілька разів застосовувати оптимальний метод з очищення внутрішньої порожнини газопроводу. У окремих

випадках застосовують комбінацію різних методів у певній послідовності. Окреслена проблема є актуальною та пов'язана з вивченням гідродинаміки газорідних сумішей. Багато дослідників, зокрема Мамаєв В.А., Кутателадзе С.С., Телетов С.Г., Франкль Ф. І., Делей Ж.М., Марон В.І., Сахаров В.А., Мохов М.А., Капцов І.І., Одішарія Г.Є., Гусейнов Ч.С., Уолліс Г., Хьюїт Д., Холл-Тейлор Н., Баттерворс Д. та інші вивчали у своїх працях гідродинаміку газорідних сумішей. Аналізуючи роботи дослідників, можна зауважити, що об'єм забруднень у газопроводах, розрахований теоретичним шляхом, відрізняється від визначеного експериментально. Тому вказану проблему треба вивчати більш детально [4].

Формулювання мети статті

Мета цієї статті – дослідити гідравлічну ефективність міжпромислових газопроводів для встановлення причин її зниження, запобігання аваріям та відмова й забезпечення надійного транспортування газу.

Висвітлення основного матеріалу

Під час експлуатування міжпромислових газопроводів періодично виникають ускладнення, що негативно впливають на надійність транспортування газу і можуть призвести до зменшення його об'єму. Унаслідок зміни режимів експлуатування міжпромислових газопроводів відбувається постійне змінювання об'єму рідини в застійних зонах, пов'язане із процесами перерозподілу мас рідини вздовж ділянок газопроводу. Перерозподіл мас рідини ділянками газопроводу внаслідок досягнення величини критичного об'єму забруднень на одній із них або змінення режиму експлуатування газопроводу призводить до залпових викидів рідини з внутрішньої порожнини міжпромислового газопроводу до технологічного обладнання УКПГ тощо. Це може викликати аварії та відмови обладнання, забруднення довкілля, припинення подавання газу споживачам [5]. Через це доцільно провести дослідження для визначення ефективності експлуатування міжпромислових газопроводів. Для цього важливо визначити швидкість газового потоку та коефіцієнти теоретичного та фактичного гідравлічного опору.

Згідно з [6] коефіцієнт гідравлічного опору під час експлуатування газопроводу змінюється і багато в чому залежить від компонентного складу транспортованого газу. Наявність у газі сірководню призводить до корозії та підвищення коефіцієнта шорсткості внутрішньої поверхні труб. Найбільший вплив на гідравлічний опір має наявність у потоці газу рідинної фази, яка конденсується і накопичується у місцях пониження траси.

У зв'язку з викладеним вище для з'ясування причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів доцільно детально

проаналізувати різні величини. Так, фахівці УкрНДІгазу проаналізували роботу двох міжпромислових газопроводів згідно з фактичною інформацією з добових зведень у диспетчерській службі Юліївського ЦВНГК, а також із рапортів та журналів об'єктів видобування УППГ Наріжнського НГКР, УКПГ-1 Скворцівського НГКР та УКПГ-2 Юліївського НГКР протягом різних періодів року. Окрім цього використано інформацію із проектів розроблення родовищ [7,8]. На основі наявної інформації сформовано електронну версію таблиці з вихідними даними. За результатами отриманої інформації визначено динаміку змінення тисків, температур (на початку та у кінці газопроводів), об'єм транспортованого газу. Розраховано гідравлічну ефективність двох міжпромислових газопроводів Юліївського ЦВНГК.

Подано алгоритм розрахунку коефіцієнта гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів. У першу чергу на установках підготовки газу проводили відбір газу для проведення аналізу. Після цього за компонентним складом газу визначили молекулярну масу, густину газу, відносну густину та критичну температуру та тиск. Подальший розрахунок полягав у визначенні таких параметрів [9,10]:

1. Середнього тиску газу в газопроводі:

$$P_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \left(P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right), \quad (1)$$

де P_n – тиск газу на початку газопроводу, МПа; P_k – тиск газу в кінці газопроводу, МПа.

2. Середньої температури газу в газопроводі:

$$T_{cp} = T_{cp} + \frac{T_n - T_k}{\ln \frac{T_n - T_{cp}}{T_k - T_{cp}}}, \quad (2)$$

де T_n – температура газу на початку газопроводу, К; T_k – температура газу в кінці газопроводу, К; T_{cp} – температура ґрунту, К.

3. Коефіцієнта стисливості газу за середніх значень тиску і температури:

$$Z_{cp} = 1 - 5,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{P_{cp} \cdot \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}, \quad (3)$$

де P_{cp} – середній тиск, МПа; Δ – відносна густина газу за повітрям; T_{cp} – середня температура, К.

4. Середньої швидкості газу в газопроводі:

$$W_{cp} = \frac{4 \cdot Q \cdot 10^3}{\pi \cdot D_e^2 \cdot 86400} \cdot \frac{Z_{cp} \cdot P_{cm} \cdot T_{cp}}{Z_{cm} \cdot P_{cp} \cdot T_{cm}}, \quad (4)$$

де Q – об'єм транспортованого газу, тис.м³/доб; Z_{cp} – коефіцієнт стисливості за P_{cp} і T_{cp} ; P_{cm} – стандартний тиск у газопроводі, МПа; T_{cp} – середня температура газу в газопроводі, К; D_e – внутрішній діаметр газопроводу, м; Z_{cm} – коефіцієнт стисливості за P_{cm} і T_{cm} ; P_{cp} – середній тиск у газопроводі, МПа; T_{cm} – стандартна температура газу в газопроводі, К.

5. Числа Рейнольдса:

$$Re = 17,75 \cdot \frac{Q \cdot \Delta}{D_e \cdot \mu}, \quad (5)$$

де Q – об'єм транспортованого газу, млн.м³/доб; Δ – відносна густина газу за повітрям; D_e – внутрішній діаметр газопроводу, м; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с.

6. Теоретичного значення коефіцієнта гідравлічного опору:

$$\lambda_m = 0,067 \cdot \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k_e}{D_e} \right)^{0,2}, \quad (6)$$

де Re – число Рейнольдса; k_e – коефіцієнт еквівалентної шорсткості труби, мм; D_e – внутрішній діаметр газопроводу, мм.

7. Фактичного значення коефіцієнта гідравлічного опору:

$$\lambda_\phi = \frac{(105,087)^2 \cdot D_e^5 \cdot (P_n^2 - P_k^2)}{\Delta \cdot Z_{cp} \cdot T_{cp} \cdot L \cdot Q^2}, \quad (7)$$

де D_e – внутрішній діаметр газопроводу, м; P_n – тиск газу на початку газопроводу, МПа; P_k – тиск газу в кінці газопроводу, МПа; Δ – відносна густина газу за повітрям; Z_{cp} – коефіцієнт стисливості за P_{cp} і T_{cp} ; T_{cp} – середня температура газу в газопроводі, К; L – довжина газопроводу, км; Q – об'єм транспортованого газу, млн. м³/доб.

8. Коефіцієнта гідравлічної ефективності:

$$E = \sqrt{\frac{\lambda_m}{\lambda_\phi}}, \quad (8)$$

де λ_m – теоретичне значення коефіцієнта гідравлічного опору; λ_ϕ – фактичне значення коефіцієнта гідравлічного опору.

Слід зазначити, що за результатами розрахунків коефіцієнт гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів перебуває в широкому діапазоні значень. Через це досліджено гідравлічну ефективність у різний період року та отримано такі результати:

1) для міжпромислового газопроводу від УППГ Наріжнського НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР коефіцієнт гідравлічної ефективності перебуває в межах від 75 % до 98 %;

2) для міжпромислового газопроводу від УКПГ-1 Скворцівського НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР коефіцієнт гідравлічної ефективності перебуває в межах від 69 % до 96 %.

Вочевидь, що коефіцієнт гідравлічної ефективності постійно змінюється в часі, що зумовлене багатьма чинниками. За умови змінення температури доквілля, особливо в осінньо-зимовий період року, найчастіше спостерігали динаміку зниження гідравлічної ефективності, пов'язану не лише з наявністю рідини, але й гідратуотворенням. Установлено, що в разі збільшення об'єму транспортованого газу і за умови накопичення рідини у внутрішній порожнині в окремих випадках спостерігали не зростання гідравлічної ефективності,

а зменшення. Це явище зумовлене тим, що за умови досягнення критичного об'єму рідини у внутрішній порожнині міжпромислового газопроводу відбувається залповий викид її до сепараторів ГЗ-1, ГЗ-2 вимірювальних ліній УКПГ-2. Цей факт підтверджує збільшення видобутку об'єму рідини на вимірювальній лінії за певні дні. Тільки отримані результати розрахунків на основі фактичних параметрів роботи міжпромислових газопроводів дають підстави сказати про стабільність або нестабільність експлуатування міжпромислових газопроводів. Окрім цього, за допомогою розрахунків визначили об'єм забруднень у внутрішній порожнині газопроводів у різний період року та порівняли з фактичним.

Треба зазначити, що результати розрахунків об'єму забруднень мають наближений характер, оскільки на практиці вимірювання об'єму рідини із внутрішньої порожнини газопроводу на вимірювальній лінії відрізняється від розрахункового. Так, спочатку виміряли видобувні можливості свердловин на вимірювальних лініях на УППГ Наріжнського НГКР та УКПГ-1 Скворцівського НГКР, при цьому визначали об'єм газу, вуглеводневого конденсату та пластової води. Після цього відбирали газ, що надходить у міжпромислові газопроводи для визначення компонентного складу, густини, точки роси за вологою та за вуглеводнями. На підставі цього визначали об'єм рідини, яку видобувають на технологічних установках та яка надходить у міжпромислові газопроводи разом із газом під час транспортування. У подальшому проводили промислові дослідження з вимірювання об'єму рідини, яку транспортують разом із газом на вимірювальних лініях УКПГ-2 у сепараторах ГЗ-1, ГЗ-2 та розділювачах РЗ-1, РЗ-2. Таким чином, визначали об'єм рідини, як розрахунковим, так і дослідним шляхом. Так, за результатами проведених експериментальних досліджень об'єм накопичених забруднень у міжпромислових газопроводах був більший за розрахунковий на 6 – 15 %.

Під час проведення промислових досліджень на вимірювальних лініях УКПГ-2 із розділювачів вимірювальних РЗ-1, РЗ-2 відбирали проби отриманої рідини для аналізу вмісту забруднень. Результат аналізування забруднень свідчить, про те, що вони є складною багатокомпонентною композицією, яка містить: пластову та конденсаційну воду, вуглеводневий конденсат, механічні домішки, метанол у різних співвідношеннях.

З огляду на викладене вище, на підставі аналізування фактичних даних експлуатування міжпромислових газопроводів, чисельних розрахунків різних величин та промислових досліджень доцільно сформулювати основні чинники, що негативно впливають на коефіцієнт гідравлічної ефективності, а саме:

1) попадання забруднень зазвичай у внутрішню порожнину під час споруджування міжпромислового

газопроводу, зокрема виконання будівельно-монтажних робіт. У разі зварювання труб в одну нитку та вкладання в траншею у внутрішню порожнину можливе попадання різних забруднень – ґрунту, глини і піску, окалин, частинок металу після зварювання, води тощо. Після змонтування газопроводу його заповнюють водою за допомогою насосного агрегату та гідравлічно випробовують на міцність і перевіряють на герметичність. У разі отримання позитивного результату – газопровід герметичний, зазвичай витісняють з нього воду, наприклад, за допомогою під'єднання пересувної азотної компресорної станції і нагнітання інертної газової суміші або іншим джерелом високонапірного газу. І тільки після цього газопровід уводять в експлуатацію. Вочевидь, можна припустити, що по завершенню всіх робіт у внутрішній порожнині можуть перебувати залишки різних забруднень (рідинних та твердих).

Промивання водою набуло широкого поширення на газопроводах, що їх споруджують з одночасним гідравлічним випробовуванням. Однак його можна застосовувати тільки перед введенням газопроводів у експлуатацію через великі витрати води, потребу подальшого її утилізування і можливого забруднення довкілля. Так, за кордоном, особливо у США, Японії, Німеччині, Франції, широко використовують промивання газопроводів за допомогою мийних засобів [6]. Перевагою промивання порівняно з продуванням і очищенням різними пристроями є ліпше видалення забруднень, особливо важких вуглеводнів і мінеральних олів. Однак процес промивання є трудомістким і потребує значних об'ємів води та реагентів, а також технології застосовування цього заходу. Його реалізація призводить до зупинення експлуатування газопроводу на тривалий час. Отже, цей захід доцільно застосовувати під час споруджування газопроводів і перед введенням їх у експлуатацію (по завершенні успішного гідравлічного випробування).

2) зміння об'єму транспортованого газу через зменшення дебіту внаслідок різних причин як однієї, так і групи свердловин, що їх експлуатують на установці підготовки газу, а потім цей газ подають у міжпромисловий газопровід. Через зниження дебіту свердловин відбувається й зниження швидкості газового потоку. Згідно з [11] у разі зменшення швидкості до 5 – 11 м/с відбувається аперіодичний хвильовий рух рідини, що супроводжується викиданням її з коліна, за умови зменшення швидкості нижче за 5 м/с має місце процес поступового накопичення рідинних забруднень;

3) зниження якості підготовки газу і як наслідок винесення рідини (пластової води із домішками метанолу, солей, глини, піску, продуктів корозії труб та вуглеводневого конденсату) газовим потоком із сепараторів у міжпромисловий газопровід, виникнення залпових викидів унаслідок порушення технологічного режиму установки підготовки

газу. Причини зниження якості підготовки газу можуть бути різні, наприклад, аварії та відмови на установках підготовки газу, уведення свердловин у експлуатацію із високим дебітом після буріння, проведення капітального ремонту, інтенсифікації тощо і при цьому сепараційне обладнання не забезпечує відділення рідини, оскільки продуктивність наближається до максимальних паспортних характеристик. Іншою причиною може бути поступове зростання на свердловинах водного фактору. Так, збільшення об'єму рідини в продукції свердловин може негативно вплинути на режим роботи сепараційного обладнання установки підготовки газу. Через це можливе зниження ефективності відділення рідинної фази з газового потоку. Отже, доцільно проводити періодичні дослідження сепараційного обладнання для визначення ефективності його роботи з відділення рідинної фази. У разі зниження ефективності роботи сепараційного обладнання розглянути доцільність його заміни або модернізації;

4) конденсування рідини у внутрішній порожнині за певного температурного режиму газу в газопроводі. На конденсування рідини у трубопроводі мають вплив різні чинники: температура і тиск газу, який подають у міжпромисловий газопровід, а також зниження температури через утрати тепла по довжині (теплообмін від газу до ґрунту), періоду року (температура довкілля) тощо. Визначаючи середню температуру в газопроводі, ураховують температуру ґрунту на глибині його прокладання із використанням довідкових даних. Так, для розрахунків у [12,13] подано дані про температуру ґрунту в різних регіонах України по місяцях протягом року.

Для зменшення втрат тепла у міжпромисловому газопроводі доцільно передбачити високоякісне ізолювання та виконати його із використанням енергозощаджувальних матеріалів, наприклад, пінополіуретану тощо;

5) змінення стану внутрішньої поверхні труб газопроводу – шорсткість труб (змінюється за умов: тертя газового потоку об внутрішні поверхні труб через наявність твердих частин, налипання пірофорних відкладів, змочування стінок труби вуглеводневим конденсатом і налипання твердих частинок тощо). Слід зазначити, що у разі зростання шорсткості труб газопроводу збільшується коефіцієнт гідравлічного опору. Для контролю коефіцієнта шорсткості труб необхідно дослідити стан внутрішньої поверхні труб по всій довжині. Це дасть змогу мати достовірну інформацію і використовувати для розрахунків потрібне значення еквівалентної шорсткості.

У [12,14] подано значення еквівалентної шорсткості для труб, виготовлених із різних матеріалів. Треба зазначити, що для сталевих зварних труб еквівалентна шорсткість перебуває в широкому діапазоні значень від 0,03 мм до 4,0 мм. Значення залежить від характеристики труб. Наприклад, для

сталевих зварних труб – нових і чистих – значення еквівалентної шорсткості перебуває в межах від 0,03 мм до 0,12 мм. Для наближених розрахунків приймають значення коефіцієнта еквівалентної шорсткості $k_e = 0,03$ мм;

б) корозія внутрішньої поверхні стінки труби спричинена різними чинниками (наявність у складі газу агресивних компонентів: сірководню, вуглекислого газу, кислот тощо). На газопроводах контролюють корозійний стан як зовнішньої стінки труб, так і внутрішньої. Корозія металу внутрішньої стінки труби призводить до збільшення шорсткості і, як наслідок, гідравлічного опору.

У разі зовнішньої корозії можливе руйнування стінки газопроводу та виходу газу на поверхню землі, що призводить до аварії. Відомо, допустима швидкість корозії у нафтогазовому обладнанні не повинна перевищувати 0,12 мм/рік [15], яка є допустимою згідно з [16]. У разі якщо понад 0,12 мм/рік – доцільно розробляти та вживати відповідних заходів для зменшення корозійної активності металу.

Контроль за корозією металу стінки газопроводу виконують так:

– здійснюють обхід траси міжпромислового газопроводу за розробленим маршрутом;

– перевіряють загазованість наземної території за розробленою схемою прокладання міжпромислового газопроводу з прив'язкою до наземної території (дороги, лісосмути, земельних ділянок тощо) для виявлення наявності утрат газу;

– візуально оглядають наземні ділянки газопроводів та перекривну арматуру;

– визначають швидкість корозії за контрольними зразками, які встановлюють у вузлах обладнання на певний період часу, а потім у лабораторних умовах вимірюють утрати маси матеріалу;

– відбирають проби рідини із внутрішньої порожнини для аналізування на вміст іонів заліза двовалентного і тривалентного;

– відбирають проби транспортованого газу для визначення компонентного складу;

– шурфують міжпромисловий газопровід вздовж траси з метою визначити стан ізоляційного покриття та вимірюють товщину стінки труб;

– діагностично обстежують внутрішню порожнину міжпромислового газопроводу.

Для захисту газопроводів від внутрішньої корозії застосовують інгібування, що передбачає подавання розчину інгібітора корозії у різному відсотковому співвідношенні. Натомість для захисту від зовнішньої (електрохімічної) корозії застосовують катодний і протекторний захист, а від блукливих струмів – електродренажні поляризовані установки;

7) профіль траси – висхідні та низхідні ділянки, природні та штучні перешкоди. Аналізуючи профіль рельєфу, можна спрогнозувати місця найімовірнішого накопичення рідини та передбачити

застосування пристроїв для відведення рідини (встановлення конденсатозбірників, розширювальних камер, дрипів тощо);

8) місцеві опори – відводи, переходи, трійники, розширення, звуження, зварні стики, термокишені, а також перекривна арматура (засувки, шарові крани, кутові вентилі) тощо. Проаналізувавши проектну документацію на міжпромисловий газопровід, можна обрати перелік усіх місцевих опорів і на основі довідкових даних про різні значення коефіцієнтів виконати наближений оцінний розрахунок утрат тиску в місцевих опорах.

У [12,13] подано алгоритм розрахунків утрат тиску в місцевих опорах та довідкові значення різних коефіцієнтів цих опорів;

9) гідратуутворення внаслідок змінення термодинамічних властивостей під час транспортування газу. Гідрати у газопроводах відкладаються, як на прямолінійних ділянках, так і у місцевих опорах (відводах, трійниках, зварних стиках), у місцях переходів діаметрів, понижених ділянках траси, перекривній арматурі тощо. Також гідрати можуть відкладатися у важкопередбачуваних місцях різних ділянок газопроводів у разі певних умов для їх утворення. Отже, для своєчасного запобігання утворенню гідратів треба знати умови їх виникнення і прогнозувати місця їх можливих відкладів;

10) зниження швидкості газового потоку внаслідок накопиченої рідини (пластової та конденсаційної води, вуглеводневого конденсату, метанолу) у понижених ділянках. Накопичення рідини створює додаткові місцеві опори, які впливають на режим роботи міжпромислового газопроводу і знижують газовий потік до значення, меншого ніж потрібно для винесення рідини із внутрішньої порожнини, а також збільшують гідравлічний опір;

11) нерівнопрохідність газопроводу (переходи діаметрів) сприяє зниженню температури. Унаслідок зниження температури можливе як конденсування рідини, так і відкладання гідратів. Через це такі ділянки газопроводу можна віднести до небезпечних, для яких характерна велика ймовірність відкладання гідратів;

12) змінення тиску в газопроводі споживача (зростання) призводить до змінення тиску на всій ділянці руху газу від устя свердловини до установки підготовки газу, а в подальшому відповідно до початкового та кінцевого тиску у міжпромисловому газопроводі, що може негативно вплинути на об'єм транспортованого газу, знижуючи його. Змінення тиску в газопроводі споживача часто спостерігають у літній період року, що зумовлено зменшенням об'єму споживаного газу;

13) фізико-хімічні характеристики транспортованої продукції (компонентний склад, густина, температура точки роси за вологою та за вуглеводнями). Під час експлуатування свердловин і відповідно транспортування газу міжпромисловими

газопроводами його склад змінюється. Наявність у транспортованому газі важких вуглеводнів збільшує ймовірність конденсування рідини. Окрім цього, висока температура точки роси теж сприяє конденсуванню рідини;

14) матеріал газопроводу (марка сталі) та стан внутрішнього покриття, виконаного за заводських умов. Одним із ефективних заходів, що дасть змогу надійно експлуатувати газопроводи, є нанесення на внутрішню поверхню труб спеціального покриття для зниження шорсткості. Цей захід сприятиме кращому руху газорідного потоку та недопущенню відкладання гідратів;

15) вплив температури довкілля у разі проходження міжпромислового газопроводу надземними ділянками. У такому випадку відбувається вплив температури довкілля на зовнішню стінку трубопроводу, що може призвести до змінення температури газового потоку і відповідно сприятиме конденсуванню рідини або гідратуутворенню;

16) надходження рідини з іншого міжпромислового газопроводу. У разі під'єднання кількох міжпромислових газопроводів можливе періодичне надходження рідини із газовим потоком з одного в інший. Так, наприклад, до міжпромислового газопроводу від УКПГ-1 Скворцівського НГКР до УКПГ-2 Юлівського НГКР під'єднаний інший міжпромисловий газопровід від УКПГ-2 до УКПГ-1 Скворцівського НГКР, завдяки чому вуглеводневу сировину із двох установок підготовки газу транспортують одним газопроводом. Отже, можна припустити, що рідина частково потрапляє з одного у другий міжпромисловий газопровід;

17) фактичний діаметр міжпромислового газопроводу значно більший необхідного. У разі транспортування малого об'єму газу неможливо забезпечити потрібну швидкість газового потоку для винесення рідини із внутрішньої порожнини, що сприятиме її поступовому накопиченню;

18) залпові викиди рідини із внутрішньої порожнини міжпромислового газопроводу на установку підготовки газу. Під час експлуатування міжпромислових газопроводів відбувається як змінення режиму експлуатування, так і об'єму накопиченої рідини у внутрішній порожнині, і за умови її зростання до критичного значення відбуваються залпові викиди її до сепараційного обладнання УКПГ-2. У ході досліджень в сепараторах ГЗ-1, ГЗ-2 вимірювальних ліній УКПГ-2 протягом певного періоду спостерігали різний об'єм вилученої рідини, а в окремі дні – її суттєве зростання. Підтвердженням цього було змінення параметрів експлуатування міжпромислових газопроводів, а також зростання їх гідравлічної ефективності завдяки зменшенню об'єму накопиченої рідини у внутрішній порожнині.

Під час промислових досліджень встановлено, що накопичення рідини у понижених ділянках міжпромислового газопроводу створює додаткові місцеві опори, які негативно впливають на

забезпечення потрібної швидкості газового потоку для винесення водоконденсатної суміші, а у окремих випадках – до зниження об'єму транспортованого газу або ж припинення транспортування взагалі. Окрім цього, мають місце гідратування на різних ділянках міжпромислового газопроводу, які можуть сягати значної довжини. Важливим є те, що гідрати природних газів хоча і є твердими кристалічними сполуками, але змінення термобаричних умов призводить до їх розкладання. Однак, якщо певні термобаричні умови зберігаються, відклади гідратів у газопроводі можуть перебувати тривалий час.

Отже, подані ускладнення безумовно мають великий вплив на гідравлічний опір міжпромислового газопроводу і призводять до зниження гідравлічної ефективності та відповідно пропускної здатності. Наслідком цих ускладнень є значні втрати тиску по довжині газопроводу.

Аналізування причин утворення рідинних забруднень в порожнині двох міжпромислових газопроводів свідчить про можливість їх появи внаслідок:

– механічного крапельного винесення рідини із сепаратора;

– конденсування рідини з газового потоку за сприятливих термодинамічних умов трасою промислового газопроводу.

За результатами розрахунків та досліджень встановлено причину потрапляння рідини у міжпромислові газопроводи через те, що на УППГ Наріжнського НГКР та УКПГ-1 Сквицького НГКР відбувається одноступеневе сепарування газу. Окрім цього, можливі залпові викиди рідини із сепараторів у міжпромисловий газопровід.

Очевидно, рідина (вода та вуглеводневий конденсат) є основним чинником, що знижує пропускну здатність міжпромислових газопроводів. Підвищення гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів можна досягти високоякісним підготовлянням газу відповідно на УППГ Наріжнського НГКР та УКПГ-1 Сквицького НГКР, а також ефективним очищенням внутрішньої порожнини газопроводів різними методами.

Слід сказати, що окрім рідини на роботу міжпромислових газопроводів негативно впливає гідратування. Відкладання гідратів спостерігають на різних відстанях по міжпромислових газопроводах. Часто гідратування спостерігають у другій половині ділянки газопроводів або на відстані близько одного, двох кілометрів від УКПГ-2 Юліївського НГКР, що зумовлено зниженням температури газового потоку через наявність багатьох місцевих опорів і відповідно створенням певних умов. Для запобігання гідратуванню подають інгібітор гідратування різними способами. Так, наприклад, подають інгібітор гідратування за допомогою дозувальних насосів, пересувного

насосного агрегату в потік газу за напрямком руху газового потоку, за умови зниження тиску у газопроводі, або навпаки його зростання після зупинення потоку на певний період часу.

Для своєчасного виявлення ускладнень пов'язаних, як з накопиченням рідини, так і з гідратуванням персонал технологічних установок фіксує тиск, температуру та об'єм протранспортованого газу і записує у рапорт та журнал. За наявними даними виконують розрахунки з визначення таких параметрів: швидкість газового потоку, гідравлічна ефективність, втрати тиску по довжині. Таким чином, фахівці промислу аналізують робочі параметри міжпромислових газопроводів, а також результати розрахунків, що дає змогу своєчасно вживати різних заходів для запобігання ускладненням та боротьби з ними.

Для забезпечення надійного експлуатування міжпромислових газопроводів розроблено низку різних заходів, які дають змогу забезпечувати надійне транспортування газу. Розглянемо нижче заходи, яких уживають індивідуально до кожного із міжпромислових газопроводів.

1) Міжпромисловий газопровід від УППГ Наріжнського НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР:

а) для поліпшення очищення газу на УППГ Наріжнського НГКР послідовно під'єднано два сепаратори: основний ГС-1 та дослідний ГС-2. Це дасть змогу додатково очищувати газ за рахунок його надходження у послідовно під'єднані сепаратори;

б) для забезпечення винесення рідини газовим потоком із внутрішньої порожнини газопроводу періодично закачують розчин ПАР на УППГ Наріжнського НГКР за допомогою пересувного насосного агрегату;

в) створюють швидкісний газовий потік для винесення накопиченої рідини із внутрішньої порожнини на УКПГ-2 Юліївського НГКР за рахунок припинення транспортування газу, а потім його відновлення;

г) для запобігання гідратуванню у внутрішній порожнині газопроводу періодично подають метанол за допомогою наявних насосів, розташованих на території УППГ Наріжнського НГКР.

2) Міжпромисловий газопровід від УКПГ-1 Сквицького НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР:

а) для запобігання відкладанню гідратів у внутрішній порожнині газопроводу періодично або постійно подають метанол за допомогою насосів із УКПГ-1 Сквицького НГКР. Окрім цього, періодично закачують метанол за допомогою пересувного насосного агрегату за умови:

– фактичного режиму експлуатування міжпромислового газопроводу або його змінення; при цьому інгібітор гідратування подають у внутрішню порожнину трубопроводу із УКПГ-1 Сквицького НГКР;

– зупинки на певний період свердловин, з яких подають вуглеводневу сировину у міжпромисловий газопровід. Потім частково знижують тиск у міжпромисловому газопроводі, що сприятиме розкладанню гідратів; після цього інгібітор гідратоутворення подають у внутрішню порожнину трубопроводу із УКПГ-1 Сквирицького НГКР, а потім вводять зупинені свердловини в експлуатацію, що дасть змогу створити швидкісний газовий потік для винесення залишків гідратів на УКПГ-2 Юліївського НГКР;

– зупинки на певний період свердловин, з яких подають вуглеводневу сировину у міжпромисловий газопровід. Після цього інгібітор гідратоутворення подають у внутрішню порожнину трубопроводу із УКПГ-1 Сквирицького НГКР, а потім вводять зупинені свердловини в експлуатацію, що дасть змогу створити швидкісний газовий потік для винесення залишків гідратів на УКПГ-2 Юліївського НГКР.

б) внутрішню порожнину очищують за допомогою швидкісного газового потоку, який забезпечують переведенням міжпромислового газопроводу в роботу на УКПГ-1, де тиск першого ступеня сепарації є нижчим ніж на УКПГ-2 Юліївського НГКР;

в) закачують розчин ПАР у міжпромисловий газопровід із УКПГ-1 Сквирицького НГКР для винесення рідини газовим потоком на УКПГ-2 Юліївського НГКР.

Завдяки застосуванню розроблених заходів на практиці можна забезпечувати стабільну експлуатацію міжпромислових газопроводів і не допустити зниження транспортування газу.

У подальшому для стабільної експлуатації міжпромислових газопроводів рекомендовані такі заходи:

– для оперативного контролювання параметрів експлуатації міжпромислових газопроводів на початку та в кінці доцільно встановити давачі тиску і температури з отриманням робочих параметрів на автоматизованому робочому місці (АРМ) диспетчера. Це дасть змогу відслідковувати змінення термобаричних параметрів та своєчасно вживати заходи для запобігання можливим ускладненням;

– створити електронний журнал, наприклад, у файлі MS Excel, у який вносити фактичні дані тиску, температури та щодобові об'єми протранспортованого міжпромисловими газопроводами газу. Це дасть змогу слідкувати за динамікою змінень параметрів роботи міжпромислових газопроводів та переглядати архівні дані;

– за фактичними даними тиску і температури побудувати залежність зміни параметрів по довжині міжпромислових газопроводів при стабільній і нестабільній їх роботі. У випадку зниження параметрів установити ймовірні причини цих ускладнень;

– розробити програмне забезпечення для визначення основних параметрів ефективної

експлуатації міжпромислових газопроводів (швидкості газового потоку, коефіцієнта гідравлічного опору теоретичного та фактичного, гідравлічної ефективності) та з подальшим установленням на АРМ диспетчера для проведення розрахунків в реальному часі;

– модернізувати сепараційне обладнання на УППГ Наріжнянського НГКР та УКПГ-1 Сквирицького НГКР установленням додаткового або заміненням на нове згідно з виконаними техніко-економічними розрахунками;

– установити на міжпромислових газопроводах у понижених ділянках розширювальні камери для запобігання накопиченню рідини;

– застосовувати раціональні методи очищення внутрішньої порожнини міжпромислових газопроводів на основі проведених досліджень, наприклад, використовувати піни середньої та високої кратності, створювати швидкісний газовий потік тощо;

– періодично створювати швидкісний газовий потік у міжпромислових газопроводах зниженням тиску першого ступеню сепарації на УКПГ-2 Юліївського НГКР на певний період часу;

– спорудити інгібіторопровід від УКПГ-2 до місця переходу зовнішніх діаметрів із 114 мм на 159 мм на міжпромисловому газопроводі від УКПГ-1 Сквирицького НГКР до УКПГ-2 Юліївського НГКР, що дасть змогу запобігти гідратоутворенню на ділянці із наявністю значної кількості місцевих опорів.

Висновки

Проаналізовано наявний стан двох міжпромислових газопроводів. На основі фактичних даних проведено розрахунки із визначення ефективності експлуатації міжпромислових газопроводів. Треба зазначити, що коефіцієнт гідравлічної ефективності на двох міжпромислових газопроводах змінюється у часі в широкому діапазоні, зокрема на одному від 75 % до 98 %, а на другому від 69 % до 96 %. Однією з основних причин цього зниження є накопичення рідини у внутрішній порожнині міжпромислових газопроводів та гідратоутворення. Установлено, що результати розрахунків об'єму забруднень у внутрішній порожнині міжпромислового газопроводу мають наближений характер. Так, за результатами проведених експериментальних досліджень об'єм накопичених забруднень у міжпромислових газопроводах був більший за розрахунковий на 6 – 15 %. Для підвищення ефективності експлуатації міжпромислових газопроводів рекомендовано моніторити гідравлічний стан, що дасть змогу своєчасно вжити відповідних заходів із очищення внутрішньої порожнини.

За результатами розрахунків, промислових досліджень та фактичних даних сформульовано основні чинники, які призводять до зниження

коефіцієнта гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів. Це дасть змогу ретельно контролювати різні чинники задля недопущення зниження коефіцієнта гідравлічної ефективності та зменшення об'єму транспортованого газу, що негативно впливає на досягнення планових показників з видобутку.

Автори рекомендують низку технологічних заходів, основними з яких є: модернізувати сепараційне обладнання або замінити його на нове, що дасть змогу поліпшити якість підготовленого газу; установити розширювальні камери на понижених ділянках; застосовувати раціональні методи очищення внутрішньої порожнини міжпромислових газопроводів на основі промислових досліджень.

Список літератури

1. Ковалко, М. П. Трубопровідний транспорт газу / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, Д. Ф. Тимків, Л. С. Шлапак, О. М. Ковалко. – Київ: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.
2. Воловецький, В. Б. Способи очищення внутрішньої порожнини шлейфів газових та газоконденсатних свердловин / В. Б. Воловецький, О. Ю. Витязь, В. І. Коцаба, О. М. Щирба // *Нафтогазова енергетика*. – 2015. – Вип. 2 (24). – С. 32-43.
3. Воловецький, В. Б. Дослідження гідравлічної ефективності міжпромислового газопроводу від УППГ Наріжнського ГРП до УКПГ 2 Юліївського НГРП / В. Б. Воловецький, О. Ю. Витязь, О. М. Щирба, В. І. Коцаба, Н. М. Коцаба / *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2012. – Вип. 3 (44). – С. 158-165.
4. Воловецький, В. Б. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба, О. Ю. Витязь, Я. В. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2013. – Вип. 3 (48). – С. 147-155.
5. Братах, М. І. Динаміка рідинних формувань в порожнині міжпромислового газопроводу / М. І. Братах, І. М. Рuzина, А. В. Соболєва // *Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наукових праць*. – Х.: 2009. – Вип. XXXVII. – С. 287-293.
6. Дячук, В. В. Очищення газопроводів с допомогою пен / В. В. Дячук, В. К. Тихомиров, В. Н. Гончаров, И. И. Капцов. – Одеса: "Папірус", 2002. – 210 с.
7. Комплексний проект розробки газоконденсатних та нафтових покладів Скворцівського НГРП, звіт про НДР, за договором 100 ХГВ/2009-2009 (тема 51.215/2009-2009).
8. Уточнений проект розробки Наріжнського НГРП (заключний), звіт про НДР, за договором 100 ХГВ/2010-2010 (тема 51.258/2010-2010).
9. Бойко, В. С. Довідник з нафтогазової справи / В. С. Бойко, Р. М. Кондрат, Р. С. Яремійчук. – Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Львів, 1996. – 620 с.
10. ОНТП 51-1-85 Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы. Мингазпром. – Москва, 1986.

11. Капцов, І. І. Причини збільшення перепадів тиску по трасі газопроводів системи видобутку і збору газу / І. І. Капцов, Г. О. Хоменко, М. І. Братах // *Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наукових праць*. – Х.: 2005. – Вип. XXXIII. – С. 99-107.
12. Братах, М. І. Основы межпромыслового транспорта газа / М. И. Братах, В. Г. Топоров, М. И. Фык. – Харьков: Эксклюзив, 2016. – 248 с.
13. Волков, М. М. Справочник работника газовой промышленности / М. М. Волков, А. Л. Михеев, А. А. Конев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 286 с.
14. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – 2-е издание перераб. и доп. М.: Недра, 1982. – 224 с.
15. Мельник, А. П. Дослідження захисних властивостей інгібіторів корозії у середовищах технологічного обладнання Яблунівського ВПГ / А. П. Мельник, С. В. Кривуля, В. А. Лактіонов, Д. О. Дегтярьов // *Нафтогазова галузь України*. – 2018. – №6. – С. 29-34.
16. NACE RP0775-2005 Preparation, Installation, Analysis and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operation. – Houston: NACE International, 2005. – 16 p.

References (transliterated)

1. Kovalko, M. P., Hrudz, V. Ya., Mykhalkiv, V. B., Tymkiv, D. F., Shlapak, L. S., Kovalko, O. M. Truboprovodnyi transport hazu. – Kyiv: Ahentstvo z ratsionalnoho vykorystannia enerhii ta ekolohii, 2002. -600 s.
2. Volovetskyi, V. B., Vytiaz, O. Yu., Kotsaba, V. I., Shchyrba, O. M. Sposoby ochyshchennia vnutrishnoi porozhnyny shleifiv hazovykh ta hazokondensatnykh sverdlovyh. *Naftohazova enerhetyka*, 2015, 2 (24), 32-43.
3. Volovetskyi, V. B., Vytiaz, O. Yu., Shchyrba, O. M., Kotsaba, V. I., Kotsaba, N. M. Doslidzhennia hidravlichnoi efektyvnosti mizhpromyslovoho hazoprovodu vid UPPH Narizhnianskoho HKR do UKPH 2 Yulivskoho NHKR. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2012, 3 (44), 158-165.
4. Volovetskyi, V. B., Shchyrba, O. M., Vytiaz, O. Yu., Doroshenko, Ya. V. Analiz prychnyn znyzhennia hidravlichnoi efektyvnosti mizhpromyslovykh hazoprovodiv ta vybir sposobiv yii pidvyshchennia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2013, 3 (48), 147-155.
5. Bratakh, M. I., Ruzina, I. M., Soboleva, A. V. Dynamika ridynnykh formuvan v porozhnyni mizhpromyslovoho hazoprovodu. *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy: Zb. naukovykh prats*, Kh.:2009, XXXVII,287-293.
6. Diachuk, V. V., Tikhomirov, V. K., Goncharov, V. N., Kaptsov, I. I. Ochistka gazoprovodov s pomoshchiu pen. Odessa: "Papirus", 2002. – 210 s.
7. Kompleksnyi proekt rozrobky hazokondensatnykh ta naftovykh pokladiv Skvortsivskoho NHKR, zvit pro NDR, za dohovorem 100 KHHV/2009-2009 (tema 51.215/2009-2009).
8. Utochneni proekt rozrobky Narizhnianskoho NHKR (zakliuchnyi), zvit pro NDR, za dohovorem 100 KHHV/2010-2010 (tema 51.258/2010-2010).
9. Boiko, V. S., Kondrat, R. M., Yaremichuk, R. S. Dovidnyk z naftohazovoi spravy. Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu. – Lviv, 1996. – 620 s.
10. ONTP 51-1-85 Obshchесоюзные нормы технологического проектирования. Magistralnye truboprovody. Chast 1. Gazoprovody. Mingazprom – Moskva, 1986.

11. **Kaptsov, I. I., Khomenko, H. O., Bratakh, M. I.** Prychyny zbilshennia perepadiv tysku po trasi hazoprovodiv systemy vydobutku i zboru hazu. *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy: Zb. naukovykh prats*, Kh.: 2005, XXXIII, 99-107.
12. **Bratakh, M. I., Toporov, V. G., Fyk, M. I.** Osnovy mezhpromyslovogo transporta gaza. – Kharkov: Ekskliuziv, 2016. – 248 s.
13. **Volkov, M. M., Mikheiev, A. L., Koniev, A. A.** Spravochnik rabotnika gazovoi promyshlennosti. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Niedra, 1989. – 286 s.
14. **Altshul, A. D.** Gidravlicheskiie soprotivleniia. 2-e izdaniie pererab. i dop. M.: Niedra, 1982. – 224 s.
15. **Melnyk, A. P., Kryvulia, S. V., Laktionov, V. A., Dehtiarov, D. O.** Doslidzhennia zakhysnykh vlastyvostei inhibitoriv korozii u seredovyshchakh tekhnolohichnoho obladnannia Yablunivskoho VPH. *Naftohazova haluz Ukrainy*, 2018, 6, 29–34.
16. NACE RP0775-2005 Preparation, Installation, Analysis and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operation. – Houston: NACE International, 2005. – 16 p.

Відомості про авторів (About the Authors)

Воловецький Володимир Богданович – старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; Україна; <https://orcid.org/0000-0001-8575-5143>; e-mail: vvb11@ukr.net.

Volodymyr Volovetskyi – senior research worker, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv; Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-8575-5143>; e-mail: vvb11@ukr.net.

Щирба Оксана Миколаївна – начальник відділу, Український науково-дослідний інститут природних газів «УкрНДІгаз», м. Харків; Україна; <https://orcid.org/0000-0002-4584-7446>; e-mail: omschyrba@ukr.net.

Oksana Shchyrba – head of department, Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases «UkrNDIgaz», Kharkiv; Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4584-7446>; e-mail: omschyrba@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Воловецький, В. Б. Дослідження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів / **В. Б. Воловецький, О. М. Щирба** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 3-13. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.01.

Please cite this article as:

Volovetskyi, V., Shchyrba, O. Investigation of the hydraulic efficiency of gathering gas pipelines. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 3–13, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Воловецкий, В. Б. Исследования гидравлической эффективности межпромисловых газопроводов / **В. Б. Воловецкий, О. Н. Щирба** // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 3-13. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.01.

АННОТАЦИЯ Проанализировано существующее состояние двоих межпромисловых газопроводов: одного от установки предварительной подготовки газа (УППГ) Нарижнянского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) до установки комплексной подготовки газа-2 (УКППГ-2) Юльевского НГКМ и другого – от УКППГ-1 Скворцовского НГКМ до УКППГ-2 Юльевского НГКМ. В разное время года определена гидравлическая эффективность межпромисловых газопроводов, которая находится в широком диапазоне: от 75 % до 98 % на одном и от 69 % до 96 % на втором. Исследованы режимы работы межпромисловых газопроводов. Определен объем загрязнений на промыслах с помощью расчетов. Проведены промышленные исследования по измерению объема загрязнений, транспортируемых вместе с газом, на измерительных линиях УКППГ-2 в сепараторах и разделителях. Установлено, что объем загрязнений, определенный по результатам проведенных экспериментальных исследований является больше расчетного значения. Сформулированы основные факторы, негативно влияющие на гидравлическую эффективность газопровода. Контроль приведенных основных факторов позволит не допустить снижения коэффициента гидравлической эффективности и уменьшения объема транспортированного газа, а также обеспечить достижение плановых показателей по добыче. Установлены основные причины снижения гидравлической эффективности межпромисловых газопроводов в связи с накоплением жидкостных загрязнений во внутренней полости и гидратообразованиями. Предложены пути решения этих проблем, которые внедрили, а также применяются на производстве в настоящее время. В частности, закачивают раствор ПАВ с помощью передвижного насосного агрегата, создают скоростной газовый поток для вынесения накопленной жидкости из внутренней полости межпромисловых газопроводов на УКППГ-2 Юльевского НГКМ и подают метанол с помощью имеющихся насосов с УППГ Нарижнянского НГКМ и УКППГ-1 Скворцовского НГКМ. Авторы предложили ряд мер по предотвращению аварий и отказов, обеспечивающие надежную эксплуатацию межпромисловых газопроводов. Системность проводимых исследований позволит оценить возможность возникновения осложнений из-за накопления жидкости и откладывания гидратов.

Ключевые слова: скважина; газ; межпромисловый газопровод; накопление жидкости; гидратообразование; гидравлическая эффективность.

Надійшла (received) 01.09.2019

УДК 621.89:621.762:621.822

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.02

ВОЗМОЖНОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГРУНТООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ ЛИТЫМИ ИЗДЕЛИЯМИ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕЙНИТНОГО ЧУГУНА

С. М. ВОЛОЩЕНКО¹, К. А. ГОГАЕВ¹, Ю. Н. ПОДРЕЗОВ¹, М. Г. АСКЕРОВ^{1*},
А. М. МИРОПОЛЬСКИЙ²

¹Отдел № 10, ИПМНАН Украины, Киев, УКРАИНА

²ПДО НУХТ, Киев, УКРАИНА

*e-mail: mukafatask@gmail.com

АННОТАЦИЯ Проведен сравнительный анализ эксплуатации зарубежных и украинских сменных деталей почвообрабатывающей сельхозтехники. Ресурс работы отечественных деталей в несколько раз уступает ресурсу зарубежным образцам. Кроме того, импортные детали не подходят к навесному оборудованию техники, произведенной в Украине. Количество зарубежной сельхозтехники постоянно увеличивается, что требует увеличение поставок сменных деталей, стоимость которых в 5 – 8 раз превышает стоимость деталей украинского производства. В этой связи задача замены импортных деталей аналогичными деталями отечественного производства с высоким ресурсом работы, не уступающему ресурсу лучших образцов зарубежного производства, является весьма актуальной. В Институте проблем материаловедения НАНУ проведены работы по созданию технологии изготовления литых лемехов из высокопрочного бейнитного чугуна, обладающих ресурсом, сравнимым и превышающим ресурс лучших зарубежных образцов. Получено, что ресурс эксплуатации для сельхозтехники отечественного производства оказывается в 3-6 раз, а для машин, импортируемых из-за рубежа, в 1,5-3 раза больше при использовании бейнитного высокопрочного чугуна для сменных деталей, непосредственно участвующих в обработке почвы. Высокая износостойкость литых деталей из бейнитного высокопрочного чугуна объясняется появлением TRIP-эффекта (деформабилити), связанного с превращением остаточного аустенита в мартенсит. Перспектива использования представленной технологии литья деталей почвообрабатывающей техники позволит снизить себестоимость изготовления сменных деталей в Украине в 1,5-4 раза по сравнению с деталями, поставляемыми из-за рубежа.

Ключевые слова: высокопрочный бейнитный чугун; сменные детали; навесное оборудование; грунтообрабатывающая сельхозтехника; TRIP-эффект; аустенит; мартенсит

POSSIBILITIES OF IMPORT SUBSTITUTION OF REPLACEABLE PARTS FOR SOIL-CULTIVATING AGRICULTURAL MACHINERY BY PARTS FROM HIGH-STRENGTH BAINITIC CAST IRON

S. VOLOSCHENKO¹, K. GOGAEV¹, Yu. PODREZOV¹, M. ASKEROV¹, A. MIROPOLSKIY²

¹Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kiev, UKRAINE

²IPE at the NU of Food Technology, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT A comparative analysis of the exploitation of foreign and Ukrainian replaceable parts of soil-cultivating agricultural machinery is carried out. The resource of the work of domestic parts is several times less than the resource for foreign models. In addition, imported parts do not match the attachments of equipment produced in Ukraine. The number of foreign agricultural machinery is constantly increasing, which requires an increase in the supply of replacement parts, the cost of which is 5 – 8 times higher than the cost of parts produced in Ukraine. In this regard, the task of replacing imported parts with similar parts of domestic production with a high resource of work, not inferior to the resource of the best samples of foreign production, is very relevant. The Institute for Material Science Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine has carried out work on the development of a technology for the production of cast plowshares from high-strength bainitic cast iron with a resource comparable and exceeding that of the best foreign samples. The purpose of this work is to develop a technology for the production of cast interchangeable parts in a high service life in replacement of existing serial steel samples. It was found that the service life for agricultural machinery in Ukraine is 3-6 times, and for foreign machinery is 1.5-3 times higher by using high-strength bainitic cast iron for replaceable parts involved in soil cultivation. The high wear resistance of cast parts from high-strength bainitic cast iron is explained by the appearance of the TRIP-effect (deformability) associated with the conversion of residual austenite to martensite. The proposed technology for casting parts of soil-cultivating machinery will reduce the cost of replaceable parts manufacturing in Ukraine by 1.5-4 times compared to foreign parts.

Keywords: high-strength bainite cast iron; replacement parts; attached equipment; soil cultivating equipment; TRIP-effect; austenite; martensite

Введение

Сравнительный анализ эксплуатации сменных деталей навесного оборудования грунто-

обрабатывающей сельхозтехники украинских и зарубежных производителей показывает, что последние по качеству изготовления значительно превосходят отечественные. Основной недостаток

деталей украинского производства – низкая износостойкость при пахотных работах. К примеру, качество и производительность плужной вспашки в первую очередь зависит от работы сменных деталей сельхозтехники. Современные украинские сменные детали для грунтообрабатывающей сельхозтехники имеют низкое качество изготовления, кроме того металл не всегда отвечает требованиям стандартов, что приводит к повышенному их срабатыванию. Вследствие этого, несмотря на значительное (с 30 млн. га до 18 млн. га) уменьшение обрабатываемых площадей, ежегодно увеличивается потребляемое количество рабочих органов (700 – 750 тыс.шт. лап культиваторов, до миллиона лемехов, 600 – 650 тыс. шт. дисков), кроме того теряется из-за отсутствия утилизации тысячи тонн дорогой легированной стали.

Цель работы

Целью данной работы является разработка технологии производства сменных литых деталей из высокопрочного бейнитного чугуна. Бейнитный чугун в последние годы привлекает повышенное внимание исследователей в связи с его уникальными свойствами сопротивляться усталостному разрушению и износу. В лабораторных условиях произвести триботехническое испытание образцов из высокопрочного бейнитного чугуна для сравнения с образцами из серийных стальных сменных деталей при работе в разных типах грунта.

Изложение основного материала

В ИПМ НАНУ разработана технология изготовления литых сменных деталей почвообрабатывающей сельхозтехники из высокопрочного бейнитного чугуна с шаровидным графитом. В основу технологии положено применение порошковых модификаторов, изготавливаемых методом прокатки, использование которых обеспечивает получение заданной структуры и свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии для последующей термической обработки. Использование изотермической закалки в установленных термовременных режимах дает возможность получать за счет появления TRIP-эффекта [1-7] высокие триботехнические характеристики металла и, как следствие, большой ресурс эксплуатации деталей при работе в различных условиях. Лемеха, лапы культиваторов, долота различного типа испытывались в разных регионах Украины – Киевской, Полтавской, Черкасской и Одесской областях. Полевые испытания литых деталей из высокопрочного бейнитного чугуна показали увеличение ресурса эксплуатации в 3-4 раза по лемехам и в 5-6 раз по лапам культиваторов по сравнению с серийными деталями отечественного производства [8-12].

В дальнейшем работы были продолжены в направлении замены импортных деталей зарубежного производства на отечественные, которые изготавливались по разработанной технологии.

Используемая номенклатура деталей сельхозтехники зарубежного производства, работающих в Украине, очень разнообразна. К сожалению, используемая техника поставляется из разных стран различными производителями и, соответственно с различными схемами крепления. Крупная компания «Астарта», которая имеет в аренде около 300 тыс. га обрабатываемых угодий, использует главным образом оборудования компании «WIL-RICH». Опытная партия литых образцов лап культиваторов для предпосевной обработки была передана в ЧП им. Довженко этой компании (Полтавская обл.) и прошла испытания при обработке земельных участков в 2016-2017 годах. Кроме того, по заявкам ЧП им. Довженко в 2017 году было изготовлено долота рыхлителя «Vogel Noot» в количестве 65 шт., что обеспечило работу импортной техники в хозяйстве в 2017-2018 годах. В процессе испытаний проводились замеры деталей с целью определения динамики и зон износа. На рис. 1 показаны схемы замера износа лап культиватора и долота рыхлителя.

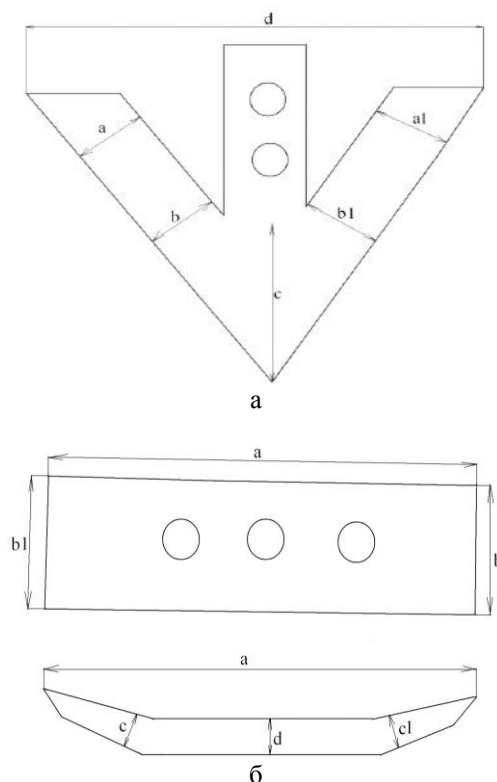


Рис. 1 – Схема проведения замеров для определения износа деталей: а - лапа культиватора, б - долото

В табл. 1 и табл. 2 указаны данные замеров при эксплуатации серийных изделий и литых деталей в 2016 г.

Литые детали из высокопрочного чугуна показали рост ресурса в 2 и более раз по сравнению с деталями зарубежного производства. Выявленные недостатки в конструкции крыльев лап культиваторов были устранены при проектировании пресс-форм для

серийного производства деталей этого типа. В последующем было дополнительно изготовлены рабочие партии лап культиваторов. Новые образцы вместе с деталями, работавшими ранее, продолжали эксплуатацию до предельного износа.

Таблица 1 – Данные по износу серийных и опытных лап после эксплуатации в летне-осенний период 2016 г.

Серийная лапа						Литая лапа				
Место измерения	Размеры новой лапы	Размер лапы после эксл.	Наработка на одну лапу	Износ		Размер новой лапы	Размер после эксл.	Наработка на единицу.	Износ	
				мм	%				мм	%
a	55	33	21,8	22	40	55	45	21,8	10	18
b	55	40	21,8	15	27	65	55	21,8	10	16
a1	55	20	21,8	25	64	55	45	21,8	10	18
b1	55	28	21,8	27	49	65	52	21,8	13	20
з	150	90	21,8	60	40	145	115	21,8	30	20
d	253	250	21,8	3	1	245	245	21,8	0	0

Таблица 2 – Данные по износу при сравнительных испытаниях долот глубокого рыхления

Серийное долото						Литое долото з БВЧКГ				
Место измерения	Размеры нового долота	Размеры после эксл.	Наработка на ед., га	Износ		Размер нового долота	Розм. после эксл.	Наработка на ед., га	Износ	
				мм	%				мм	%
a	455	361	23,3	94	21	454	385	78,8	69	15
b	85	70	23,3	15	18	86	85	78,8	1	1
b1	85	75	23,3	10	12	85	85	78,8	85	0
з	19,5	17	23,3	2,5	13	24	22	78,8	2	2
c1	19,5	15	23,3	4,5	23	24	18,5	78,8	5,5	23
d	19,5	17	23,3	2,5	13	24	22	78,8	2	9

Ресурс лап из высокопрочного бейнитного чугуна составил в среднем 180 га на единицу, и в 2,8-3 раза превысил ресурс оригинальных деталей. В 2017 году проходили испытания лапы прополочного культиватора, которые были изготовлены для ЧП им. Довженко в 2016 году. Эти детали проработали на уровне оригинальных, но из-за большого угла боковых крыльев давали значительный слой окучивание и мало выполняли основную задачу - подрезание бурьяна при прополке. В дальнейшем в технологическую оснастку были внесены коррективы в конструкцию и уменьшен угол боковых крыльев.

По заказам фирмы «Арника», которой принадлежит ЧП им. Т.Г. Шевченко (Полтавская обл.), в 2017 году было изготовлено оборудование для серийного производства по газмоделям лап культиваторов (рис. 2) «Great Plains» (близкий аналог WIL-RICH). На предприятии «Агромаш» г. Жмеринка Винницкой области было изготовлено 350 шт. лап культиваторов «Great Plains», из которых 56 шт. дополнительно было направлено в ЧП им. Довженко для дальнейшей эксплуатации. В 2017-2018 годах испытывались опытные литые лапы культиватора «JOHN DEERE» аналогичной конструкции в

агрофирме ООО «Лан-Агро» Полтавская область в количестве 200 шт.



Рис. 2 – Литая лапа культиватора Great Plains.
Масса детали - 2кг

Вместе с литыми лапами из высокопрочного бейнитного чугуна устанавливались также оригинальные стальные лапы производства «JOHN DEERE». Опытные лапы показали ресурс в 1,5 раза больше, чем у серийных. По результатам испытаний были внесены коррективы в конструкцию носовой части лапы культиватора для увеличения их ресурса и обеспечения при работе острой кромки лезвия.

Фирмой ООО «Лан-Агро» в 2017 году были дополнительно заказаны новые опытные образцы насадок для лемехов производства компании Gregorie Besson" и «Lemken» (рис. 3). Предприятием «Агромаш» было изготовлено по 350 шт. насадок на лемеха указанных фирм общей массой 1450 кг.



Рис. 3 – Насадки на лемеха фирм «Lemken»(а) и «Gregorie Besson»(б). Масса деталей – 2кг

Испытания насадок, начатые в ноябре 2017 г., были продолжены в 2018 году. Полевые испытания

показали увеличение ресурса работы литых деталей по сравнению с оригиналами более, чем в 1,5 раза. Детали не выработали своего ресурса при вспашке в 2018 году и будут продолжать работу до полного износа в 2019 году. Кроме того, по заказу агрофирмы «Арника» было изготовлено опытно-промышленную партию лап культиватора для передачи фирме-производителю этой техники "Einbock" (Австрия) для проведения сертификационных испытаний и получения сертификата качества деталей из высокопрочного бейнитного чугуна, изготовленных по технологии ИПМ НАН Украины. Были проведены также сравнительные испытания в ЧП им. Довженко литых рыхлителей глубокого рыхления культиватора «Soil Pro». Масса оливки 11,5 кг (рис. 4). Эти детали (оригинал) стоят 5500 грн. Наши расчеты показывают, что подобные детали, изготовленные из бейнитного высокопрочного чугуна, в условиях серийного производства будут стоить в пределах 1500 грн.



Рис. 4 – Лапы глубокого рыхления разрыхлителя «Soil Pro»

Отлитые детали были переданы для эксплуатации в ЧП им. Довженко и показали ресурс на уровне оригинальных. Нарботка на единицу составило 615-625га.

Проведенные нами исследования показали несомненную перспективность использования высокопрочного бейнитного чугуна для деталей почвообрабатывающей техники как отечественного, так и зарубежного производства. Ресурс работы литых деталей в 3-5 раз превышает ресурс деталей украинского производства и в 1,5-3 раза деталей зарубежного изготовления известных производителей. Себестоимость изготовления сменных деталей в Украине в 1,5-4 раза дешевле, чем деталей, поставляемых из-за рубежа.

Выводы

Использование технологии литья позволяет легко получать любые сменные детали почвообрабатывающей сельхозтехники и вносить в них дополнительные конструктивные изменения с

целью улучшения качества работы и повышения ресурса как для отечественных, так и для зарубежных машин.

Применения бейнитного высокопрочного чугуна для сменных деталей, непосредственно участвующих в обработке почвы, обеспечивает ресурс эксплуатации в 3-6 раз больше для сельхозтехники отечественного производства и в 1,5-3 раза для машин, импортируемых из-за рубежа.

Список литературы

1. Гогаев, К. А. Влияние остаточного аустенита на механические свойства и характеристики износа бейнитного чугуна с шаровидным графитом / К. А. Гогаев, С. М. Волощенко, Ю. Н. Подрезов, Н. В. Миначков, Н. М. Марченко // *Электронная микроскопия и прочность материалов*. – 2016. – Выпуск 21. – С. 38 – 50.
2. Fordyce, E. P. The Dry Sliding Wear Behaviour of an Austempered Spheroidal Cast Iron / E. P. Fordyce, C. Allen // *Wear*. – 1995. – No. 135. – P. 265– 278. – doi: 10.1016/0043-1648(90)90030-E.
3. Shimizu, K. Basic Study on Erosive Wear of Ductile Iron. / K. Shimizu, T. Noguchi, T. Yamaguchi, T. Kamada // *AFS Transactions*. – 1994. – No. 63. – P. 285 – 289.
4. Mohammad, BabaZadeh. Wear Characteristics of ADIs. A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters / D. Mohammad BabaZadeh, HaMiD PourAsiabi, Hamed PourAsiabi // *J. Basic. Appl. Sci. Res*. – 2013. – 3(2). – P. 646 – 656.
5. Chang, L. C. Effects of Heat Treatment on the Erosion Behavior of Austempered Ductile Irons / L. C. Chang, I. C. Hsui, L. H. Chen, T. S. Lui // *Wear*. – 2006. – No. 260. – P. 783 – 793. – doi: 10.1016/j.wear.2005.04.017.
6. Schissler, J. M. Abrasive Wear Resistance of Austempered Ductile Iron at Room Temperature / J. M. Schissler, P. Brenot, J. P. Chobaut // *Mater. Sci. Tech*. – 1987. – No. 5. – P. 71 – 77.
7. Hayrynen, K. L. Carbide Austempered Ductile Iron (CADI) – The New Wear Material / K. L. Hayrynen, K. R. Barandberg // *AFS Transactions*. – 2003. – P. 1 – 6.
8. Волощенко, С. М. Возможности и перспективы использования бейнитного чугуна при изготовлении лемехов / С. М. Волощенко, А. С. Волощенко, А. И. Виноградский // *Процессы литья*. – 2007. – № 5. – С. 56 – 61.
9. Волощенко, С. М. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термообробки / С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, М. Г. Аскеров, В. Т. Варченко // *Зб.наук.праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії»*, Краматорськ. – 2008. – № 1(11). – С. 56 – 61.
10. Волощенко, С. М. Термічна обробка лемешів із високоміцного чавуну / С. М. Волощенко, В. І. Ульшин, М. Г. Аскеров, М. Д. Бега, С. В. Ульшин // *Металознавство та обробка металів*. – 2009. – № 4. – С. 25 – 31.
11. Волощенко, С. М. Применение высокопрочного бейнитного чугуна для производства сменных деталей грунтообрабатывающей техники отечественного

производства / С. М. Волощенко, К. А. Гогаев, А. М. Мировольский, М. Г. Аскеров, В. В. Непомнящий // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія*. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 131 – 137.

12. Гогаєв, К. О. Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей сільгосптехніки / К. О. Гогаєв, С. М. Волощенко // *Вісник Національної академії наук України*. – 2015. – № 9. – С. 64 – 68.

References (transliterated)

1. Gogaev, K. A., Voloschenko, S. M., Podrezov, Yu. N., Minakov, N. V., Marchenko, N. M. Vliyanie ostatochnogo austenita na mehanicheskie svoystva i harakteristiki iznosa beynitnogo chuguna s sharovidnyim grafitom. *Elektronnaya mikroskopiya i prochnost materialov*, 2016, 21, 38 – 50.
2. Fordyce, E. P., Allen, C. The Dry Sliding Wear Behaviour of an Austempered Spheroidal Cast Iron. *Wear*, 1995, 135, 265– 278, doi: 10.1016/0043-1648(90)90030-E.
3. Shimizu, K., Noguchi, T., Yamaguchi, T., Kamada, T. Basic Study on Erosive Wear of Ductile Iron. *AFS Transactions*, 1994, 63, 285 – 289.
4. Mohammad, BabaZadeh, PourAsiabi, HaMiD, PourAsiabi, Hamed. Wear Characteristics of ADIs. A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters. *J. Basic. Appl. Sci. Res*, 2013, 3(2), 646 – 656.
5. Chang, L. C., Hsui, I. C., Chen, L. H., Lui, T. S. Effects of Heat Treatment on the Erosion Behavior of Austempered Ductile Irons. *Wear*, 2006, 260, 783 – 793, doi: 10.1016/j.wear.2005.04.017.
6. Schissler, J. M., Brenot, P., Chobaut, J. P. Abrasive Wear Resistance of Austempered Ductile Iron at Room Temperature. *Mater. Sci. Tech*, 1987, 5, 71 – 77.
7. Hayrynen, K. L., Barandberg, K. R. Carbide Austempered Ductile Iron (CADI) – The New Wear Material. *AFS Transactions*, 2003, 1 – 6.
8. Voloschenko, S. M., Voloschenko, A. S., Vinogradskiy, A. I. Vozmozhnosti i perspektivy ispolzovaniya beynitnogo chuguna pri izgotovlenii lemehov. *Protsessyi litya*, 2007, 5, 56 – 61.
9. Voloschenko, S. M., Gogaev, K. O., Radchenko, O. K., Askerov, M. G., Varchenko, V. T. Doslidzhennya vlastivostey visokomltsnogo chavunu dlya lemeshlv v zalezhnosti vld hlmchnogo skladu ta rezhimlv termoobrobki. *Zb.nauk.prats «VIsnik DonbaskoYi derzhavnoYi mashinobudlvnoYi akademIYi»*, Kramatorsk, 2008, 1 (11), 56-61.
10. Voloschenko, S. M., Ulshin, V. I., Askerov, M. G., Bega, M. D., Ulshin, S. V. TermIchna obrobka lemeshlv Iz visokomltsnogo chavunu. *MetaloZnavstvo ta obrobka metalv*, 2009, 4, 25 – 31.
11. Voloschenko, S. M., Gogaev, K. A., Miropolskiy, A. M., Askerov, M. G., Nepomnyaschiy, V. V. Primenenie vyisokoprochnogo beynitnogo chuguna dlya proizvodstva smennyih detaley gruntoobratyivayushey tehniky otechestvennogo proizvodstva. *NaukovI pratsI Donetskogo natslonalnogo tehlnchnogo unlvrsitetu. SerIya: MetalurgIya*, 2011, 13 (194), 131 – 137.
12. Gogaev, K. O., Voloschenko, S. M. Beynltniy chavun dlya shvidkoznoshuvanih zmlnnyih detaley slgospstehnlki. *VIsnik NatslonalnoYi akademIYi nauk UkraYini*, 2015, 9, 64 – 68.

Сведения об авторах (About authors)

Волощенко Сергей Михайлович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения НАН Украины, старший научный сотрудник отдела №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

Sergey Voloshchenko - candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

Гогаев Казбек Александрович - доктор технических наук, профессор, Институт проблем материаловедения НАН Украины, зав. отделом №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

Kazbek Gogaev - doctor of technical, professor, Institute of Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, head of the Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

Подрезов Юрий Николевич - доктор физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

Yuriy Podrezov – doctor of phys.-math, head of the Department, Institute of Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

Аскеров Мукафат Гейбат оглы - кандидат технических наук, Институт проблем материаловедения НАН Украины, старший научный сотрудник отдела №10 ИПМ НАН Украины, г. Киев, Украина; e-mail: mukafatask@gmail.com.

Mukafat Geibat ogly Askerov - candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com.

Миропольский Александр Михайлович - кандидат технических наук, доцент, Институт последипломного образования при Национальном университете пищевой технологии, доцент ИПДО при НУПТ, г. Киев, Украина; e-mail: miral50@ukr.net.

Alexander Miropolsky - candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Postgraduate Education at the National University of Food Technology, Associate Professor of EITI at NUPT, Kiev, Ukraine; e-mail: miral50@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Волощенко, С. М. Возможности импортозамещения сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники литыми изделиями из высокопрочного бейнитного чугуна / **С. М. Волощенко, К. А. Гогаев, Ю. Н. Подрезов, М. Г. Аскеров, А. М. Миропольский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 14-19. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.02.

Please refer to this article as follows:

Voloshchenko, S., Gogaev, K., Podrezov, Yu., Askerov, M., Miropolsky, A. Possibilities of import substitution of replaceable parts for soil-cultivating agricultural machinery by parts from high-strength bainitic cast iron. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 14–19, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.02.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю таким чином:

Волощенко, С. М. Можливості імпортозаміщення змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки литими виробами з високоміцного бейнітного чавуну / **С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, М. Г. Аскеров, А. М. Міропольський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 14-19. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.02.

АНОТАЦІЯ Проведено порівняльний аналіз експлуатації зарубіжних і українських змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки. Ресурс роботи вітчизняних деталей в кілька разів поступається ресурсу зарубіжним зразкам. Крім того, імпортні деталі не підходять до навісного устаткування техніки, виробленої в Україні. Кількість зарубіжної сільгосптехніки постійно збільшується, що вимагає збільшення поставок змінних деталей, вартість яких в 5 – 8 разів перевищує вартість деталей українського виробництва. У зв'язку з цим завдання заміни імпортних деталей аналогічними деталями вітчизняного виробництва з високим ресурсом роботи, що не поступається ресурсу кращих зразків зарубіжного виробництва, є вельми актуальною. В Інституті проблем матеріалознавства НАНУ проведено роботи по створенню технології виготовлення литих лемешів з високоміцного бейнітного чавуну, що володіють ресурсом, який близький та перевищує ресурс кращих зарубіжних зразків. Отримано, що ресурс експлуатації для сільгосптехніки вітчизняного виробництва виявляється в 3-6 разів, а для машин, що імпортуються, в 1,5-3 рази більшим при використанні високоміцного бейнітного чавуну для змінних деталей, які безпосередньо приймають участь в обробці ґрунту. Висока зносостійкість литих деталей з високоміцного бейнітного чавуну пояснюється появою TRIP-ефекту (деформабіліті), який пов'язаний з перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит. Перспектива використання представленої технології лиття деталей ґрунтообробної техніки дозволить знизити собівартість виготовлення змінних деталей в Україні в 1,5-4 рази в порівнянні з деталями, що поставляються з-за кордону.

Ключові слова: високоміцний бейнітний чавун; змінні деталі; навісне обладнання; ґрунтообробна сільгосптехніка; TRIP-ефект; аустеніт; мартенсит

Поступила (received) 01.09.2019

УДК 621.472:629.78

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.03

OVERVIEW OF THE UKRAINIAN SOLAR MARKET: STATUS AND COMMERCIAL PERSPECTIVES

R. ZAITSEV^{1*}, K. MINAKOVA²

¹ Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Physics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

*e-mail: zaitsev@kphi.edu.ua

ABSTRACT Today, solar energy is called the energy of the future, and many companies make significant investments in the construction of such power plants. The article provides an overview of the commercial perspectives of this market, determines the size of investments and the return on the project. Modern solar panels are able to operate without additional investments for decades and, from the point of view of the authors, in the long term the electricity generated in this way will not only cost-effective, and extremely profitable. The global situation in the energy market and in the field of renewable energy, in particular, is considered. The reasons that triggered the development of renewable energy sources, the key of which are the dangers of nuclear energy and environmental pollution, are explained. Along with this, we consider the structure of the market of renewable energy sources in Ukraine, where the geographic location is favorable for the implementation of solar energy projects. The climate of Ukraine is characterized by a large number of sunny days: in terms of insolation, Ukraine is significantly superior to European leaders in solar energy. This basic factor allows us to talk about the commercial perspectives of solar power generation projects implemented in Ukraine. Against the background of these perspectives is considered the structure of the energy market in Ukraine and the investment attraction of renewable energy projects. Market trends in the development of the solar energy market were discussed, which are expected to contribute to the development of new market niches, such as after-sales services, as well as the transformation of existing business models against the backdrop of the introduction of new facilities.

Keywords: solar energy; renewable energy sources; Ukrainian market overview; commercial perspectives

ОГЛЯД РИНКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ: СТАН ТА КОМЕРЦІЙНІ ПЕРСПЕКТИВИ

Р. В. ЗАЙЦЕВ^{1*}, К. О. МІНАКОВА²

¹ Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² Кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Сьогодні багато хто називає сонячну енергію енергією майбутнього, і багато компаній вкладають значні інвестиції в будівництво таких електростанцій. У статті наведено огляд комерційних перспектив цього ринку, визначені розміри інвестицій і окупність проекту. Сучасні сонячні батареї в змозі працювати без додаткових капіталовкладень десятки років і, з точки зору авторів, в довгостроковій перспективі електроенергія, згенерована таким чином, стане не просто рентабельною, а надприбутковою. У статті розглянута глобальна ситуація в сфері ринку енергетики і в сфері відновлюваних джерел енергії, зокрема. Пояснені причини, які послужили поштовхом у розвитку відновлюваних джерел енергії, ключовими з яких є небезпека атомної енергетики і забруднення навколишнього середовища. На ряду з зазначеним, розглянута структура ринку відновлюваних джерел енергії на Україні, географічне розташування якої сприятливо для реалізації проектів сонячної енергетики. Для клімату України характерна велика кількість сонячних днів: за ступенем інсоляції Україна значно перевищує європейських лідерів в сонячній енергетиці. Зазначене є базовим фактором, що дозволяє говорити про комерційні перспективи проектів сонячної електрогенерації, що реалізуються в Україні. На тлі зазначених перспектив розглянута структура енергетичного ринку на Україні і інвестиційна привабливість проектів відновлюваної енергетики. Обговорено ринкові тенденції розвитку ринку сонячної енергетики, які, як очікується, на тлі введення нових об'єктів сприятимуть розвитку нових ринкових ніш, таких як сервісне обслуговування, а також трансформації існуючих бізнес-моделей.

Ключові слова: сонячна енергетика; відновлювані джерела енергії; огляд ринку України; комерційні перспективи

The global situation in the field of power generation from renewable energy sources

After the world felt the whole danger of nuclear energy and became infected with the idea of getting energy from renewable sources, such as sunlight and wind, a river of funding surged in that direction. The effect was not long in coming: in two decades, the

efficiency of solar panels, battery power and reliability of wind generators increased sharply, and their cost decreased significantly.

Today, many calls solar energy the energy of the future, and many companies make significant investments in the construction of such power plants. Modern solar cells are able to operate without additional investment for decades and, in our opinion, in the long term, the

electricity generated in this way will become not only cost-effective, but also extremely profitable.

Renewable energy sources (RES), which are usually attributed to the energy of the sun, water, wind, biomass, demonstrate a positive dynamic in the share in the global energy balance.

This is due to the following circumstances:

- the fight against global warming is becoming more and more systematic. The Paris Climate Change Agreement outlines specific measures to reduce greenhouse gas emissions;

- the development of electricity generation based on renewable energy sources has targeted support from states, tariff and tax incentives allow competing with generation based on traditional energy sources;

- the cost of photovoltaics (the main technology of power generation using solar panels) is reduced - the cost of solar panels in the world is reduced by 10% annually.

Solar energy is considered the most promising direction of the energy industry, since in recent years, market prices for solar modules have significantly decreased, and their efficiency has been increasing. According to the statistical report of British Petroleum [1], by the end of 2017, the total installed power of solar power plants built and commissioned worldwide exceeded 400 GW (Fig. 1). This power is generated at the expense of 301 500 solar power plants (SPP). It is noteworthy that 48% of them are in Asia. The indicator of the total installed power demonstrates stable positive dynamics over a long period. According to the report of the International Energy Agency [2], in 2018-2019 this figure will increase by 100-150 GW per year.



Fig. 1 - The dynamics of the total installed power of solar power plants in the world, GW

Intensification of growth in the number of SPP and increasing the share of energy generated by them in the overall balance - a problem that is solved on the level of state policy. As a rule, the cost of renewable energy generation exceeds the cost of energy from traditional sources, and it is possible to bring new players to the market only with systemic support from states. Over the past 10 years, the leading positions in SPP-based power generation have belonged to Germany and Italy; however, thanks to the implementation of large-scale programs to stimulate solar energy (Table 1), the list of leaders has been expanded by countries such as China, the USA and Japan (Fig. 2).

Table 1 - Regional features of incentive policies RES

Parameter	EU	USA	China
RES share	In final consumption - 16.7% as of 2015	The total share of all RES reached 19.4% as of 2016.	The share of green energy exceeds 35% of the total installed power in the country as of 2016.
Features of stimulation	<ul style="list-style-type: none"> • establishment of a preferential price for the purchase of electricity generated using RES; • trade in green certificates based on quotas for the consumption of electricity generated using RES. 	<ul style="list-style-type: none"> • federal measures to support solar energy in the form of a 30% investment tax credits. 	<ul style="list-style-type: none"> • purchase of clean electricity at preferential and full tariffs; • creation of funds to finance development in the field of RES; • adoption of renewable energy priority development programs, in particular, Document 625, according to which the minimum amount of mandatory consumption of renewable energy by large grid companies is established.
Prediction for achieving the share of RES	By 2020, RES will account for about 20% of the energy supply. While only 6 EU countries had fulfilled their commitments.	In 2015, the US Department of Energy's statistical division projected an increase in the share of RES from 13% in 2013 to 18% in 2040. Actual development is ahead of prediction for a decade.	It was predicted that by 2020, RES will account for about 15% of the energy supply, but the goal for solar energy has already been achieved, and by the end of 2019 it is planned to fulfill the norm for wind electricity.

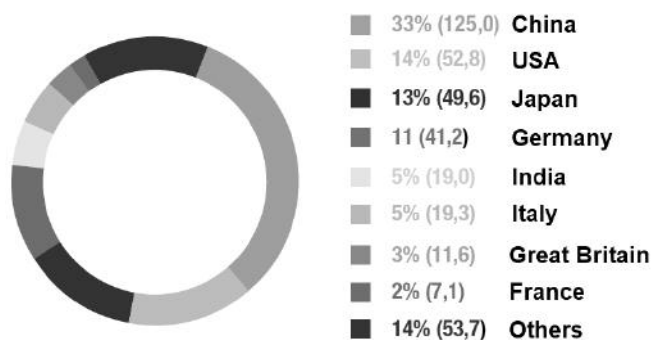


Fig. 2 - Geographical structure of power generation based on SPP as of the end of 2017, GW

A renewable energy incentive policy exists in 85 countries. Moreover, programs in this area are being developed both at the national level and at the level of individual regions and territories. Typology of measures varies from preferential rates and loans to training and internships. For the most part, the main goal of national renewable energy incentive policies is to achieve a certain share of renewable energy in the total balance of electricity generation (from 5 to 30%). In a number of cases, it is specified that the share of renewable energy should increase in the structure of final consumption (from 10 to 20%).

At the global level, we can talk about several approaches to stimulate the development of solar energy. As a rule, in countries with developed economies, where solar energy has mainly reached targets, support for the development of photovoltaics is gradually moving away from direct incentive measures for the following reasons:

- The cost of generation based on photovoltaics has declined significantly in recent years. According to Lazard's LCOE (Levelized Cost of Electricity) estimates, for wind and sun this indicator decreased over the period 2010-2017. 66% and 85% respectively, which equates to the parameters for gas and coal. As a result, the cost of generation makes such projects competitive with traditional fuels and without government support.

- Tariff regulated selling price of energy from RES is higher compared to the cost of energy from traditional sources. As a rule, the current policy obliges distribution network operators in European countries to conclude contracts for the supply of such energy for a long period (of 10 years) with a fixed price. For example, in Germany, contracts awarded 10 years ago are bought at 45-50 cents per kilowatt, while the current market price for a kilowatt of solar energy in Germany is about 12 cents.

In many respects, these circumstances caused the pace of development of photovoltaics in the EU and the US to slightly decrease. Against this background, solar generation in China, stimulated by the state in every way, demonstrates the highest rates of development. At the same time, China is actively developing the industry for the production of components for SPP, including photovoltaic elements. State support allows Chinese

suppliers to maintain price leadership in the global market by minimizing the cost of products.

International structures have a relatively small impact on stimulating the development of solar energy on a global scale. The most significant organization in this area is the International Energy Agency (IEA) and the International Renewable Energy Agency (IRENA), whose activities include analytical work, information exchange and the development of international cooperation [4].

The power indicator is called the main one in the world when evaluating the market, but the amount of investment is no less important. According to Bloomberg New Energy Finance [5], in 2016 it amounted to \$ 242 billion, which is 23% less than in the previous year. Of these, 114 billion US dollars accounted for the solar energy segment with a decline of 34% compared with the previous year, due to the previously indicated reduction in the cost of such projects. According to Frost & Sullivan [6], in 2017 the volume of investments in renewable energy sources will amount to 243 billion US dollars, of which 142 billion US dollars will be spent on solar energy.

Further development of the market will be driven by the following trends.

- Global trends:
 - According to IEA prediction, until 2022 the total power of renewable energy sources will increase by more than 920 GW, which is 3 times higher than the same indicator in 2016;
 - Wind and sun will represent more than 80% of the global renewable energy market growth over the next five years.
- Regional trends:
 - China: the total installed power of RES by the end of 2022 will increase by 63.6% compared with 2017. Also, in May 2018, the construction of the world's largest floating SPP with a power of 150 MW will be completed;
 - USA: uncertainty about the prospects for federal tax reform in the context of the implementation of incentive RES;
 - EU: transition from state support (refusal of financial stimulation of RES implementation) to a more competitive market;
 - Developing countries in sub-Saharan Africa and Africa: growth of off-grid solar photovoltaic applications - according to IEA prediction, by 2022 off-grid power will increase to 3 thousand MW, which is 3 times more than in 2017.
- Regulatory trends:
 - The transition from the "green" tariffs to competitive auctions and long-term agreements on the purchase of electricity for utilities.

The structure of the renewable energy market in Ukraine

The geographical location of Ukraine is favorable for the implementation of solar energy generation projects [7]. The climate of Ukraine is characterized by a large

number of sunny days: in terms of insolation, Ukraine significantly exceeds Germany, the recognized European leader in solar energy. This basic factor allows us to talk about the commercial prospects of solar power generation projects implemented in Ukraine [8]. The state also declares all possible support for renewable energy projects. However, in practice, the implementation of such projects requires taking into account a number of nuances, without which the initiator of the project may face serious limitations and the risk of not reaching targets.

In Ukraine, solar energy over the past 5 years has evolved from a small segment represented by several pilot projects into one of the largest rapidly growing areas. According to the American company IB Center Inc. [9], the capitalization of the Ukrainian solar energy market in 2016 exceeded \$ 1.4 billion.

However, political instability, which reached its peak in 2014, the ensuing devaluation of the hryvnia, the continuing aggravation of the risks of military conflict in the east of the country had a negative impact on investment projects direction. As a result of the annexation of the Crimea has been temporarily lost the most favorable in terms of the use of renewable energy region in which up to 2014 had already been successfully implemented such projects.

In 2014, the Energy and Utilities the National Regulatory Commission (NKREKU) implementing state regulation in the fields of energy and utilities [10] did not compensate representatives of alternative energy for losses from exchange rate differences, and "green" tariffs were reduced at the legislative level. As a result, the intensity of commissioning of new SPP has noticeably decreased (Fig. 3).

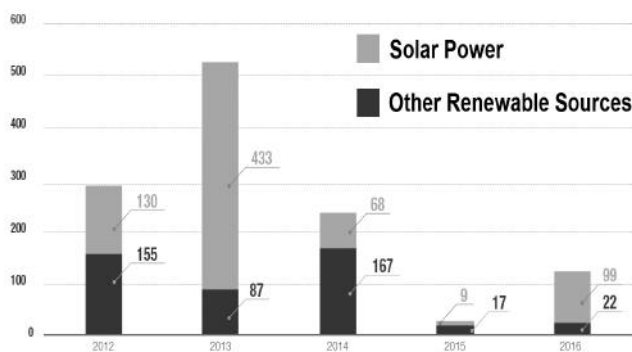


Fig. 3 - Dynamics of commissioning of renewable energy stations, MW

In 2016, there was a resumption of positive dynamics, with projects related to photovoltaics showing the greatest growth. In 2015, Law No. 514-VIII "On Amending Certain Laws of Ukraine Regarding Ensuring Competitive Conditions for the Production of Electric Power from Alternative Energy Sources" was adopted. Thus, there was a legal framework aimed at attracting investments in Ukraine, because the Law №514-VIII, tied the "green" tariff in euros [11].

According to the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine [12], as of October 1, 2017, there are 359 renewable energy facilities operating in the country with a total power of 1320 MW.

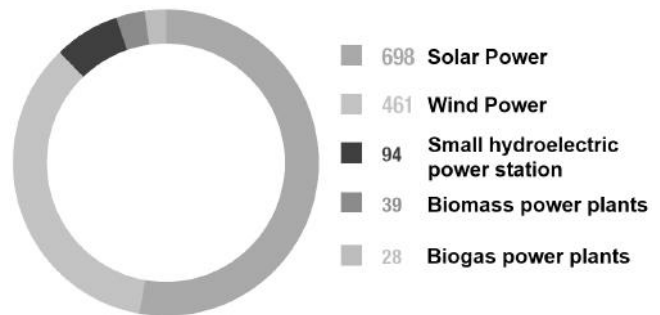


Fig. 4 - The structure of the Ukrainian renewable energy market by power, MW

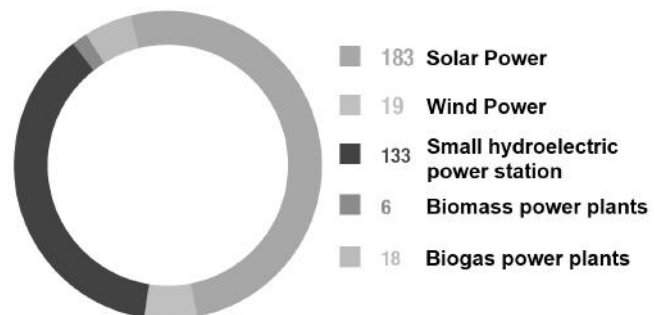


Fig. 5 - The structure of the Ukrainian renewable energy market by the number of stations, pcs

It is noteworthy that 15 of 183 SPPs account for about 20% of the total power of all SPPs. The largest SPP of Ukraine are installed in the following regions: Kropyvnytsky (125 MW), Novaya Kakhovka, Kherson region (120 MW), Kamenka, Cherkasy region (100 MW), Yavorov, Lviv region (57 MW), Priozernoe village, Odessa region (55 MW). The insolation map of Ukraine is presented in Figure 6.

Despite the fact that there is positive investment activity in the direction of green energy, alternative sources still account for a small share in the total energy production - according to the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine [12], the figure is 1% in 2017 of the year. At the same time, the market's growth potential is significant: by joining the European Energy Community, the country has committed itself to increase the share of RES in the country's energy balance to 11% by 2020.

As in most countries, state policy in Ukraine as a whole acts as a key driver for the development of electricity generation based on renewable sources, and the so-called "green" tariff is a key incentive - a special tariff schedule according to which the state purchases electric energy from commercial organizations and individuals, generated using renewable sources.

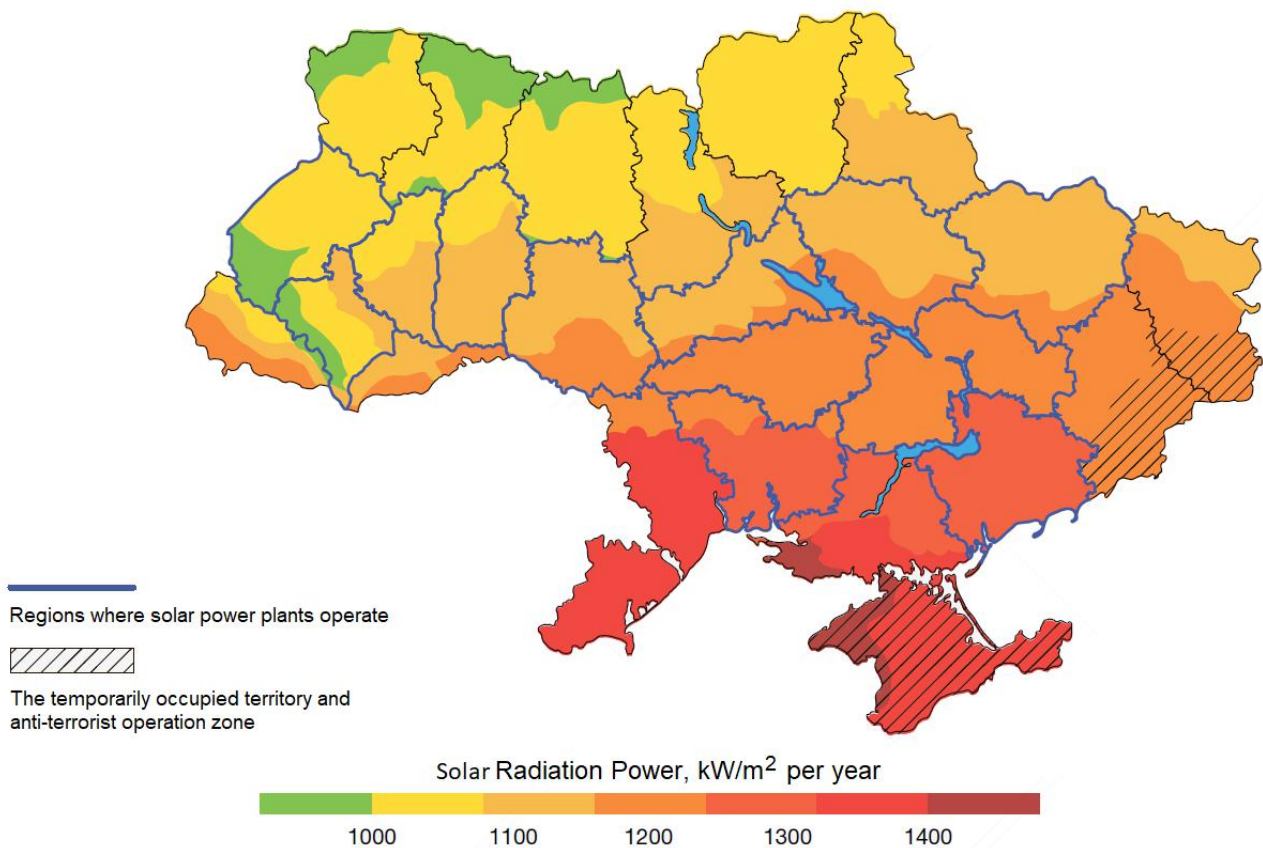


Fig. 6 - The insolation map of Ukraine

Having built and put into operation an industrial SPP in 2018, the generated electricity can be sold at 0.15 euros per 1 kW based on a long-term contract (table 2).

Table 2 - The rate of "green" tariff for solar power plants, eurocent /1 kW h

Year	The rate for private solar power with power of up to 30 kW	The rate for industrial solar power plants
2015	20	17
2016	19	16
2017-2019	18	15
2020-2024	16,3	13,5
2025-2030	14,5	12

The structure of the renewable energy market of Ukraine and the relationship of its participants

As a rule, the model of the energy market of developed countries suggests that the functions of the state are limited to regulation and tax collection. In Ukraine, the government agencies are direct market players [13]. Specifically, the State Company "Energoynok" is the only wholesale buyer and seller of electricity generating companies of all products (Fig. 7).

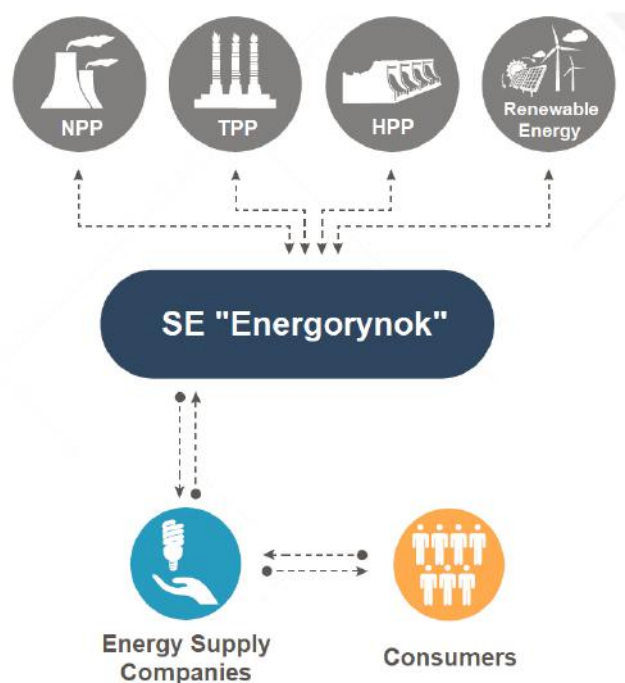


Fig. 7 - Scheme of functioning of the energy market of Ukraine

In addition, activities in this market are subject to licensing without fail and are approved by the relevant

state regulator, namely NKREKU. Such a model actually limits the ability of SPP operators to use market mechanisms to strengthen the SPP commercial potential, including in the sphere of intensifying consumer demand. As a result, the main lever for increasing efficiency for SPP operators is operating expenses management.

Another lever to increase business profitability is to achieve synergy by combining projects for the generation of electricity and equipment trade activities in a single structure, as well as providing services in the field of installation and maintenance of SPP equipment. The services of design and industrial consulting are in demand.

The largest Ukrainian operators SPP consist of [14] group company Active Solar (in 2014 the company's assets are owned by CNBM - the largest Chinese producers of building materials) and "Rentehno" - the total power installed SPP is 232 MW and 89 MW, respectively. The latter also provides industrial consulting services in foreign markets, helping clients in Europe and the Middle East.

Since only some types of components for SPP are produced in Ukraine, mainly equipment importers represent the Ukrainian market.

It is the largest company "Atmosphere", which has about 400 dealers in Ukraine, as well as representative offices in Moldova, Belarus, Latvia, Kazakhstan, and Kyrgyzstan. Components for their systems are imported from countries such as Poland, Italy, Turkey, China, Germany, and Taiwan.

Also, highlight the company "Alista" (Dnipro), which carries out import of components for SPP by "Altek" trademark. The company is also a key player in the service sector of such systems.

The suppliers of panels as basic components to the Ukrainian market are most often Chinese companies (in Asia, a significant part of the global production of photovoltaic cell components is currently located). In Ukraine, these products are represented by such brands as Suntech, UKSol, Q Cells, JA-Solar, Jinko, Q Cells, Perlight solar & Abi-solar. Also in 2017, the market appeared panel produced by the American company First Solar. Inverters (an important element of photovoltaics) in Ukraine are represented by brands ABB, SOLIS, KSTAR, SMA, Huawei, FRONIUS, OMRON, SolarEdge.

In general, the SPP market is estimated as quite promising. The potential for growth of implementation power in operation is determined by the prospects of the action of "green" tariff. Now, the expected life of "green" tariff can successfully implement projects entering into operation of new facilities, managing to achieve a payback period.

Investment attractiveness of solar energy projects in Ukraine

Factors affecting the payback of a solar power plant:

- Type of solar panels. The most common and effective ratio "price-quality" are the current panel on the cells of mono- or polycrystalline silicon, so the choice is usually made between these two types [15].

- Dependence of the level of insolation on the region. The most popular regions of Ukraine are Odessa, Dnipropetrovsk, Kherson, and Mykolajiv regions

- Orientation of solar panels on the side of light (south, north, west, east). Having the ability to rotate by using tracker mounting system, allowing generating 28-35% more energy than one hundred and stationary structures similar power (Fig. 8).

- The inclination of the solar panels relative to the horizon. A perpendicular incidence of sunlight on the panel is desirable, in the summer, this angle is 30-35°, in spring and autumn - 45°, and in winter, it is recommended to use an angle of 70° relative to the horizon.

- Country-equipment supplier. Most Chinese use solar panels (as of 2017 81% of panels produced in the world is attributable to China), which significantly reduces the cost of SPP.

- Degradation of the equipment. Monocrystalline batteries in 25 years to lose 20% efficiency, and polycrystalline modules - 30%, the warranty period of the equipment varies widely - from 5 to 25 years.

- Own power consumption and size of the object of other expenses.

- The selling price of electricity.

Actual payback when calculating at 1 MW SPP [16]:

- Initial investments - 0.75 million Euros.

- Accessories - Chinese manufacturing class Tier 1.

- Payback period – 7 years.

- Annual income - 170 thousand Euros.

- The discount rate – 12,6%.

- The internal rate of return – 19,1%.

The project reaches breakeven only if the "green" tariff is in effect (the tariff rate for industrial SPP put into operation before 2019 is 0.15 eurocents).

Solar energy market trends in Ukraine

- In the years 2019-2020 is announced the completion of the SPP many construction projects in Ukraine, Canadian, Lithuanian, Indian, Slovenian and Chinese companies.

- JSC "Oschadbank" plans to invest 27.5 million Euros for the construction of solar power plants of 35 MW in the Dnipropetrovsk region (now is under construction).

- Rodina Energy Group Ltd (Rodina) & Enerparc AG plans to launch the first solar energy project in the exclusion zone of the Chornobyl nuclear power plant; the station will have a capacity of 1 MW.

- The implementation of the Chornobyl Solar project, which is developing the State Agency of Ukraine for the Management of the Exclusion Zone, is ongoing.

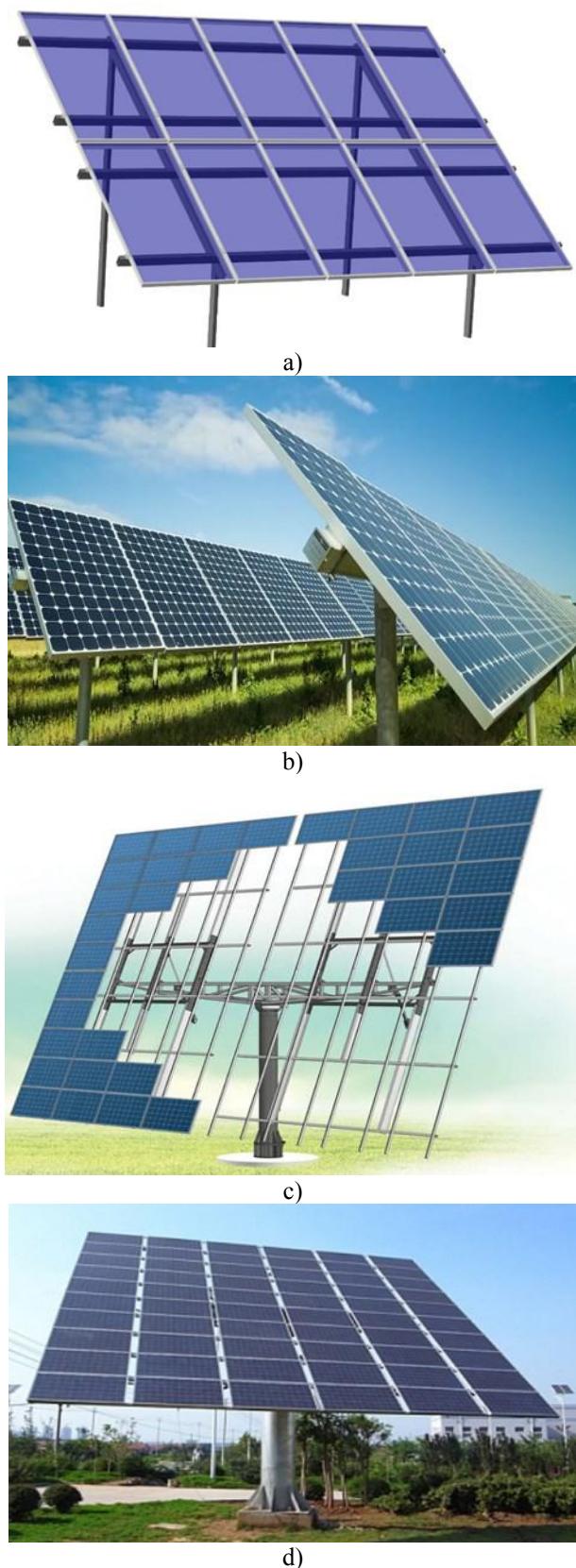


Fig. 8 – Stationary engine placement of solar panels (a, b), the angle of which changes several times a year, and a tracking system for the sun (c, d), the angle of which is adjusted every couple of minutes, providing a perpendicular drop of sunlight

The initiators of the SPP construction projects expect the government to adhere steadily to the implementation of the “Energy Strategy of Ukraine until 2035”, according to which the share of renewable energy should reach 11% in gross final consumption by 2020, and 20% by 2035. Moreover, therefore, they will not cancel the action of the “green” tariff.

In the context of the competitive potential of SPP projects, their significant mobility should be mentioned. Unlike energy generators from traditional sources, which are rigidly attached to an existing site, the solar power plant is relatively quickly dismantled and can be re-mounted in another place, if the appropriate infrastructure is available. However, now, this advantage is not relevant, since there is no practice of direct contracts with consumers.

Further development of the market will be determined by the factors presented in table 3.

Table 3 - Opportunities and barriers for operators SPP

Opportunities	Barriers
<ul style="list-style-type: none"> • The advantages of geography and climate; • An attractive “green” tariff rate for investors: 0.15 eurocents/kWh for industrial plants and about 0.18 eurocents/kWh for home stations, while at the global level, countries are already moving away from the state policy of financial incentives for RES; • Positive dynamics of lending to renewable energy projects by the EBRD (30% of the total amount in the amount of 300 million euros); • In 2017, a number of laws aimed at the development of alternative energy were also adopted, namely bill No. 4334 - to stimulate heat production from alternative sources and bill No. 6081 - to improve investment opportunities in the production sector. 	<ul style="list-style-type: none"> • Instability of the regulatory framework of state regulation of the market; • The probability of a reduction or cancellation of "green" tariff for the already constructed power plants, which could negatively affect investor confidence; • A complex system of obtaining permits and approvals to operators SPP; • Inconsistency level of technological infrastructure originally designed for conventional energy sources, as a result of such transmission lines will not be able to build their own capacity; • SPP occupy large areas - each 1 MW of power requires a minimum of 1.5 hectares of land.

A further increase in the number of projects in the field of solar energy in Ukraine will continue, because the fixed current rate of the “green” tariff, coupled with the constantly decreasing cost of equipment for solar plants, provides a relatively quick return on investment with minimal risk. In 2018-2019, there has been an acceleration in the rate of commissioning of new SPPs, since stations commissioned after 2019 will be able to

count on a green tariff, which will already be 10% less than the current one. In fact, only in 2018 about 400 MW of solar energy was installed and commissioned in Ukraine, which increased the Ukrainian market of SPP by 57%.

Conclusions

The development of the solar energy market is expected against the background of the introduction of new facilities will contribute to the development of new market niches, such as after-sales service, as well as the transformation of existing business models.

There is a possibility that in the future Ukraine will switch to the practice of concluding direct contracts, which implies that consumers conclude contracts directly with electricity producers on a competitive basis. This will allow SPP operators to implement a competitive pricing policy. In this case, the SPP mobility factor will also become significant. It is expected that such a development of the situation will not only stimulate the introduction of new stations by Ukrainian operators, but will also help attract SPP operators from other countries to Ukraine, especially if the state does not limit their ability to enter the local energy market.

Список літератури

1. British Petroleum Outlook. – 2018. – URL: <http://bp.com/energyoutlook>.
2. International Energy Agency. World Energy Outlook. – 2018. – URL: <https://www.iea.org>.
3. Lazard's Levelized Cost of Energy ("LCOE") analysis – Version 12.0. – URL: <https://www.lazard.com>.
4. Kreston GCG. Как заработать на солнце? Обзор рынка солнечной энергетики. Analytical Review. – 2018. – URL: <https://kreston-gcg.com>.
5. Bloomberg New Energy Finance. New Energy Outlook. – 2019. – URL: <https://bnef.com>.
6. Frost & Sullivan's. Global Renewable Energy Outlook. – 2018. – URL: <https://frost.com>.
7. Сокол, Е. И. Физико-технические особенности и предельные практические возможности фотоэнергетического модуля нового поколения на территории Украины / Е. И. Сокол, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев, М. В. Кириченко, А. В. Мериуц, Г. С. Хрипунов // *Відновлювана енергетика*. – 2011. – № 2 (25). – С. 18-28.
8. Мачулін, В. Сонячна енергетика: порядок денний для світу й України / В. Мачулін, В. Литовченко, М. Стріха // *Вісник національної академії наук України*. – 2011. – № 5. – С. 30-39.
9. IB Centre Inc. – URL: <http://www.ibcentre.tech>.
10. National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine. – URL: <http://www.nerc.gov.ua>.
11. Майстро, С. В. Концептуальні засади стратегії державного регулювання та перспективи розвитку альтернативної енергетики в Україні / С. В. Майстро // *Теорія та практика державного управління*. – 2015. – №. 3(50). – С. 100-106.
12. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. – URL: <http://sae.gov.ua>.

13. Процюк, Т. Б. Реформирование рынка электрической энергии Украины с учётом опыта зарубежных стран / Т. Б. Процюк // *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Економічні науки*. – 2014. – Вип. 5., Ч. 1. – С. 246-249.
14. Кудря, С. О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні / С. О. Кудря // *Вісник національної академії наук України*. – 2015. – № 12. – С. 19-26.
15. Зайцев, Р. В. Вплив робочої температури на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва / Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, Г. С. Хрипунов, Л. В. Зайцева // *Відновлювальна енергетика*. – 2017. – №. 3(50). – С. 35-41.
16. Кожем'яко, В. П. Оптимізація проектів будівництва сонячних електростанцій із врахуванням базових техніко-економічних показників / В. П. Кожем'яко, О. Г. Домбровський, В. І. Малиновський // *Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях*. – 2015. – №. 2. – С. 66-81.

References (transliterated)

1. British Petroleum Outlook, 2018. – Available at: <http://bp.com/energyoutlook>.
2. International Energy Agency. World Energy Outlook, 2018. – Available at: <https://www.iea.org>.
3. Lazard's Levelized Cost of Energy ("LCOE") analysis – Version 12.0. – Available at: <https://www.lazard.com>.
4. Kreston GCG. Как заработать на солнце? Обзор рынка солнечной энергетики. Analytical Review, 2018. – Available at: <https://kreston-gcg.com>.
5. Bloomberg New Energy Finance. New Energy Outlook, 2019. – Available at: <https://bnef.com>.
6. Frost & Sullivan's. Global Renewable Energy Outlook, 2018. – Available at: <https://frost.com>.
7. Sokol, E. I., Kopach, V. R., Zaitsev, R. V., Kirichenko, M. V., Meriuts, A. V., Khrypunov, G. S. Fiziko-tekhnicheskiye osobennosti i predel'nyye prakticheskiye vozmozhnosti fotoenergeticheskogo modulya novogo pokoleniya na territorii Ukrainy [Physicotechnical features and ultimate practical capabilities of a new generation photovoltaic module in Ukraine]. *Vidnovlyuvana energetika [Renewable energy]*, 2011, 2(25), 18-28.
8. Machulin, V., Litovchenko, V., Striha, M. Sonyachna enerhetyka: porjadok dennyy dlya svitu y Ukrainy [Solar energy: an agenda for the world and Ukraine]. *Visnyk natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 2011, 5, 30-39.
9. IB Centre Inc. – Available at: <http://www.ibcentre.tech>.
10. National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine. – Available at: <http://www.nerc.gov.ua>.
11. Maistro, S. V. Kontseptual'ni zasady stratehiyi derzhavnoho rehulyuvannya ta perspektyvy rozvytku al'ternatyvnoyi enerhetyky v Ukraini [Conceptual bases of the state regulation strategy and prospects of alternative energy development in Ukraine]. *Teoriya ta praktyka derzhavnoho upravlinnya [Public administration theory and practice]*, 2015, 3(50), 100-106.
12. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. – Available at: <http://sae.gov.ua>.
13. Protsuk, T. B. Reformirovaniye rynku elektricheskoy energiyi Ukrainy s uchotom opyta zarubezhnykh stran [Reforming the electric energy market of Ukraine taking into account the experience of foreign countries]. *Naukovyy*

- visnyk Kherson'skoho derzhavnoho universytetu. Seriya Ekonomichni nauky [Scientific Bulletin of Kherson State University. Series Economic Sciences.], 2014, 5(1), 246-249.
14. **Kudria, S. O.** Stan ta perspektyvy rozvytku vidnovlyuvanoyi enerhetyky v Ukrayini [Status and prospects of renewable energy development in Ukraine]. *Visnyk natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 2015, 12, 19-26.
15. **Zaitsev, R. V., Kirichenko, M. V., Khrypunov, G. S., Zaitseva, L. V.** Vplyv robochoyi temperatury na efektyvnist' promyslovykh zrazkiv kremniyevykh fotoelektrychnykh peretvoryuvachiv kytays'koho vyrobnytstva [Effect of operating temperature on the efficiency of industrial designs of Chinese silicon photoelectric converters]. *Vidnovlyuvana energetika [Renewable energy]*, 2017, 3(50), 35-41.
16. **Kozhemyako, V. P.** Optymizatsiya proektiv budivnytstva sonyachnykh elektrostantsiy iz vrakhuvannyam bazovykh tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv [Optimization of solar power plant construction projects taking into account basic technical and economic indicators]. *Optyko-elektronni prystroyi ta komponenty v lazernykh i enerhetychnykh tekhnolohiyakh [Opto-electronic devices and components in laser and energy technologies]*, 2015, 2, 66-81.

Сведения об авторах (About authors)

Зайцев Роман Валентинович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: zaitsev@khp.edu.ua.

Roman Zaitsev – Doctor of Engineering Science, Docent, Head of Department, Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: zaitsev@khp.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Kseniia Minakova – Ph. D., Associate Professor, Physics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: minakova_kseniia@khp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Зайцев, Р. В. Огляд ринку сонячної енергетики України: стан та комерційні перспективи / **Р. В. Зайцев, К. О. Мінакова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 20-28. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.03.

Please cite this article as:

Zaitsev, R., Minakova, K. Overview of the Ukrainian solar market: status and commercial perspectives. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 20–28, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Зайцев, Р. В. Обзор рынка солнечной энергетики Украины: состояние и коммерческие перспективы / **Р. В. Зайцев, К. О. Мінакова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 20-28. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.03.

АННОТАЦИЯ Сегодня многие называют солнечную энергию энергией будущего, и многие компании вкладывают значительные инвестиции в строительство таких электростанций. В статье приведен обзор коммерческих перспектив этого рынка, определены размеры инвестиций и окупаемость проекта. Современные солнечные батареи в состоянии работать без дополнительных капиталовложений десятки лет и, с точки зрения авторов, в долгосрочной перспективе электроэнергия, сгенерированная таким образом, станет не просто рентабельной, а сверхприбыльной. В статье рассмотрена глобальная ситуация в сфере рынка энергетики и в сфере возобновляемых источников энергии, в частности. Пояснены причины, которые послужили толчком в развитии возобновляемых источников энергии, ключевыми из которых являются опасность атомной энергетики и загрязнение окружающей среды. На ряду с указанным, рассмотрена структура рынка возобновляемых источников энергии на Украине, географическое расположение которой благоприятно для реализации проектов солнечной энергетики. Для климата Украины характерно большое количество солнечных дней: по степени инсоляции Украина значительно превосходит европейских лидеров в солнечной энергетике. Указанное является базовым фактором, позволяющим говорить о коммерческих перспективах проектов солнечной электрогенерации, реализуемых в Украине. На фоне указанных перспектив рассмотрена структура энергетического рынка на Украине и инвестиционная привлекательность проектов возобновляемой энергетики. Обсуждены рыночные тенденции развития рынка солнечной энергетики, которые, как ожидается, на фоне ввода новых объектов будут способствовать развитию новых рыночных ниш, таких как сервисное обслуживание, а также трансформации существующих бизнес-моделей.

Ключевые слова: солнечная энергетика; возобновляемые источники энергии; обзор рынка Украины; коммерческие перспективы

Поступила (received) 18.08.2019

УДК 629.1.02

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.04

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ХОДОВОЇ СИСТЕМИ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА З НАПІВПРИЧІПНИМ АГРЕГАТОМ

А. Г. МАМОНТОВ, А. П. КОЖУШКО*, О. Ю. РЕБРОВ

кафедра автомобіле- та тракторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: Andreykozhusko7@gmail.com

АНОТАЦІЯ Наведено математичну модель поздовжньо-кутового руху машинно-тракторного агрегату на базі колісного трактора та напівпричипного агрегату. Модель дозволяє враховувати нелінійні зміни пружних та дисипативних характеристик підвіски, пневматичних елементів, а також коливальний рух в шарнірі тягово-причипного пристрою. Запропоновано математичний алгоритм для визначення нелінійної характеристики пневматичної ресори залежно від деформації передньої підвіски колісного трактора. Оскільки сьогодні головними трендами сучасного тракторобудування є збільшення експлуатаційної швидкості руху та нарощування мас в вантажоперевезеннях, тоді дослідження в галузі плавності руху вважається актуальним. Це обумовлено впливом зростаючих збурювальних факторів, які виникають при збільшенні швидкостей руху на якісні показники підвіски транспортного засобу. Встановлено закономірність зміни динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора при виконанні транспортних робіт з напівпричипним агрегатом залежно від агротехнічного стану опорної поверхні та наявності зазору в тягово-зчипному пристрої. Встановлено вплив різних систем підресорювання переднього моста колісного трактора на показники плавності руху (середньоквадратичне прискорення рами та сидіння трактора) та динамічної навантаженості на ходову систему колісного трактора. Доцільність даних досліджень обґрунтовано наявністю як практичної, так і теоретичної цінності. Практична цінність роботи в тому, що вона дає змогу ще на етапі проектування або модернізації колісного трактора з напівпричипом виявити динамічні складові, які негативним чином будуть впливати на плавність руху. Теоретична значимість полягає у наданні математичного алгоритму для можливості оцінювання динамічної навантаженості ходової системи машинно-тракторного агрегату. Що дає певні ефекти від впровадження в галузі надійності.

Ключові слова: колісний трактор; напівпричип; ходова система; динамічна навантаженість; пневморесора; тягово-причипний пристрій

FORMATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC LOADING OF TRACTOR SUSPENSION WITH SEMI-TRAILER

A. MAMONTOV, A. KOZHUSHKO, O. REBROV

Department of Car and Tractor Industry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The mathematical model of the longitudinal-angular movement of a machine-tractor unit based on a wheeled tractor and semi-trailer unit is presented. The model allows you to take into account the non-linearity of changes in the elastic and dissipative characteristics of the suspension, pneumatic elements, as well as the oscillatory movement in the hinge of the towing device. A mathematical algorithm is proposed for determining the nonlinear characteristics of an air spring depending on the deformation of the front suspension of a wheeled tractor. Since today the main trends in modern tractor engineering is an increase in the operational speed of movement and mass increase in freight traffic, research in the field of smoothness of movement is considered relevant. This is due to the influence of growing disturbing factors arising from an increase in road speeds on the performance of the vehicle's high-quality suspension. The regularity of changes in the dynamic loading of the running system of a wheeled tractor during transport work with a semitrailer unit has been established depending on the agrotechnical condition of the supporting surface and the presence of a gap in the towing device. The influence of various suspension systems of the front axle of the wheeled tractor on the smoothness indicators (rms acceleration of the frame and seat of the tractor) and dynamic loading on the running system of the wheeled tractor is established. The feasibility of these studies is justified by the presence of both practical and theoretical value. The practical value of the work lies in the fact that, even at the stage of designing or modernizing a wheeled tractor with a semi-trailer, it allows to identify dynamic components that will negatively affect the smoothness of movement. The theoretical significance lies in providing a mathematical algorithm for the possibility of assessing the dynamic load of the running system of a machine-tractor unit. This gives certain effects from the implementation in the field of reliability.

Keywords: wheeled tractor; semi-trailer; chassis system; dynamic loading; air springs; tow hitch

Вступ

Вирішення задач у транспортній галузі будь-якого сектору держави завжди було пріоритетним завданням, адже модернізація або впровадження

нових технічних рішень відбивається на економіці підприємства. Особливої уваги слід надати транспорту в аграрному секторі тому, що сьогодні окрім автомобільного транспорту все частіше використовують тракторний. Це не дивно, адже доля

транспортних робіт може складати в деяких фермерських угіддях більше 50 % від загального обсягу. Це пояснюється великою трудомісткістю та енергоємністю процесів. Окрім того витрати на транспорту роботу закладаються при формуванні собівартості продукції.

Використання машинно-тракторного агрегату (МТА) на транспортних роботах пояснюється низкою факторів:

– тенденція розвитку тракторобудування свідчить про постійне нарощування енергонасиченості, що дозволяє перевозити вантаж транспортом більшої вантажопідйомності [1,2];

– технічний рівень сучасних колісних тракторів дозволяє вільно пересуватися по міським дорогам (мова йде про дотримання швидкісного режиму руху) та, водночас, виконувати тягові (технологічні) операції, тощо.

Відомо, що розробка нових технічних рішень повинна задовольняти цілому ряду показників: техніко-економічних, експлуатаційних, надійності, ергономічності, тощо. В автомобільній промисловості широкого загалу набули пневмоконструкції ходових систем (пневмостійки, пневмоподушки та пневморесори), впровадження яких дозволило задовольнити потреби вище наведених показників. В тракторобудуванні також почали використовувати дані пневмоконструкції, але комбінуючи їх з гідравлікою. Таким чином, відомо, що на тракторах серій JCB Fastrac 8000 (Великобританія), Fendt 900 Vario (Німеччина), John Deere 6R (США), New Holland T7 (США), та інші використовуються пневмогідравлічні конструкції підресорювання переднього мосту. Але наведені марки колісних тракторів є рамними, на тракторах з шарнірно-зчленованою рамою впровадження таких систем підресорювання не передбачено. Це пояснюється складністю конструювання таких тракторів, але з підвищенням технічного рівня резино-кордних виробів така проблема зникає, тому дослідження роботи та впровадження пневматичних систем підресорювання на колісні трактори з шарнірно-зчленованою рамою є актуальним.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує ряд наукових робіт [3–5], які досліджують вплив коливального процесу руху МТА на техніко-економічні (витрата палива, швидкість руху, тощо) та ергономічні показники. В роботі [3] наведено можливий спектр хвороб, що виникає у водія-оператора МТА при сталій роботі при недотриманні показників плавності руху колісного трактора. Але жодним чином не висвітлено алгоритми (експериментальний або теоретичний) визначення показників плавності руху транспортного засобу. Можливі алгоритми визначення показників плавності руху вказані в роботі [4]. Але матеріали [4] містять

лише узагальнення методів та методик досліджень, що проводились різними вченими у галузі впливу вібрації на все тіло людини водія-оператора і не мають конкретних висновків. Вже більш детально і аргументовано автори в роботі [5] підкреслюють вплив зростання експлуатаційної швидкості МТА при русі по дорозі та бездоріжжю під час польових робіт. Дослідження в роботі [5] показали, що зростання швидкостей призводить і до зростання дії вібрації на водія-оператора, але не окреслено динамічний вплив на підвіску транспортного засобу. Також слід виділити матеріали роботи [6] адже в них автори аргументовано доводять, що на самопочуття водія в значній мірі впливає нерівність опорної поверхні при транспортуванні вантажу. Але автори [6] не наводять шляхи розв'язання впливу нерівності опорної поверхні, на нашу суб'єктивну думку можливим рішенням є дослідження роботи колісного трактора з різними системами підресорювання.

Широкого загалу набули роботи [7–9], в яких автори підкреслюють значущість дослідження коливального процесу МТА з перемінною масою при виконанні транспортних робіт. У публікації [7] автори навели математичну модель, яка дозволяє оцінювати стійкість поздовжнього руху колісного трактора з причіп- та напівпричіп-цистернами. Рух рідини в цистернах призводить до нестабільності, що впливає на ряд показників МТА. Проте представлена математична модель має свої недоліки – вона представлена у відносній системі координат, що для роботи [7] достатньо, але не зовсім коректна при обчисленні динамічної навантаженості, адже розглядається лише сталий рух. Роботи [8,9] також направлені на стабілізацію руху, але за рахунок створення моделі енергетичних втрат та розкриття питань керованості руху. Ці роботи ґрунтуються на експериментальних даних і дають оцінки лише при конкретних агротехнічних профілях опорної поверхні при сталому русі транспортного засобу. Для того щоб узагальнити вплив на плавність руху необхідно широкий спектр дослідницьких можливостей. Більш коректна робота [10], в якій на основі метода контролю стійкості та диференційованого гальмування, проведено аналіз стабільності крену і механізму ризикання колісних тракторів з напівпричепним агрегатом. Робота [10] базується на дослідженні впливу параметрів МТА на стійкість шляхом створення динамічної моделі транспортного засобу. Проте дана математична модель не може розглядатися, тому що не враховується рух шарніру в тягово-зчипному пристрої, що може призвести до неточностей при побудові амплітудно-частотної характеристики.

Динамічна навантаженість, як експлуатаційний показник, розглядалась в роботах [11–14]. У роботі [11] автори навели загальний математичний апарат для розрахунку динаміки руху колісних тракторів, але жодним чином не окреслили динамічну навантаженість ходової системи. Дослідження впливу

кількості демпферних опор в транспортному засобі представлено в роботі [12], але матеріали [12] направлені на дослідження багатовісних важких автомобілів. Вже більш в явній формі динамічна навантаженість простежується в роботах [13,14], але це завантаженість агрегатів трансмісії для колісного трактора [13] та для гусеничного [14].

Тому проведений критичний аналіз літератури [3–14] дозволив сформулювати наступну мету роботи.

Мета роботи

Метою дослідження є визначення динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою шляхом наведення математичного апарату, який описує в поздовжній площині рух трактора з напівпричіпним агрегатом. Дослідження динамічної навантаженості проводилось з трьома видами конструкції системи підресорювання (переднього моста) колісного трактора (пневморесорна з амортизатором, пневморесорна без амортизатора, серійна ресорна підвіска).

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– побудувати динамічну математичну модель руху в поздовжній площині колісного трактора з напівпричіпним агрегатом. Дана модель повинна враховувати види підресорювання переднього моста трактора, нелінійність деформації пневматичних шин (трактора та напівпричепа), а також давала змогу моделювати роботу тягово-зчіпного пристрою;

– оцінити вплив систем підресорювання колісного трактора на плавність руху та динамічну навантаженість ходових систем.

Виклад основного матеріалу

Для формування математичної моделі руху колісного трактора з напівпричіпом необхідно на першому етапі побудувати розрахункову схему, яка б враховувала вертикальні, поздовжні та кутові переміщення від основних складових сил, що діють при русі. МТА, який досліджується, симетричний щодо поздовжньої вертикальної площини. Це дозволяє використати плоску (так звану «велосипедну») розрахункову схему (рис. 1), де пружні зв'язки по бортах поєднуються, а маса умовно розділяється на підресорену та непідресорену.

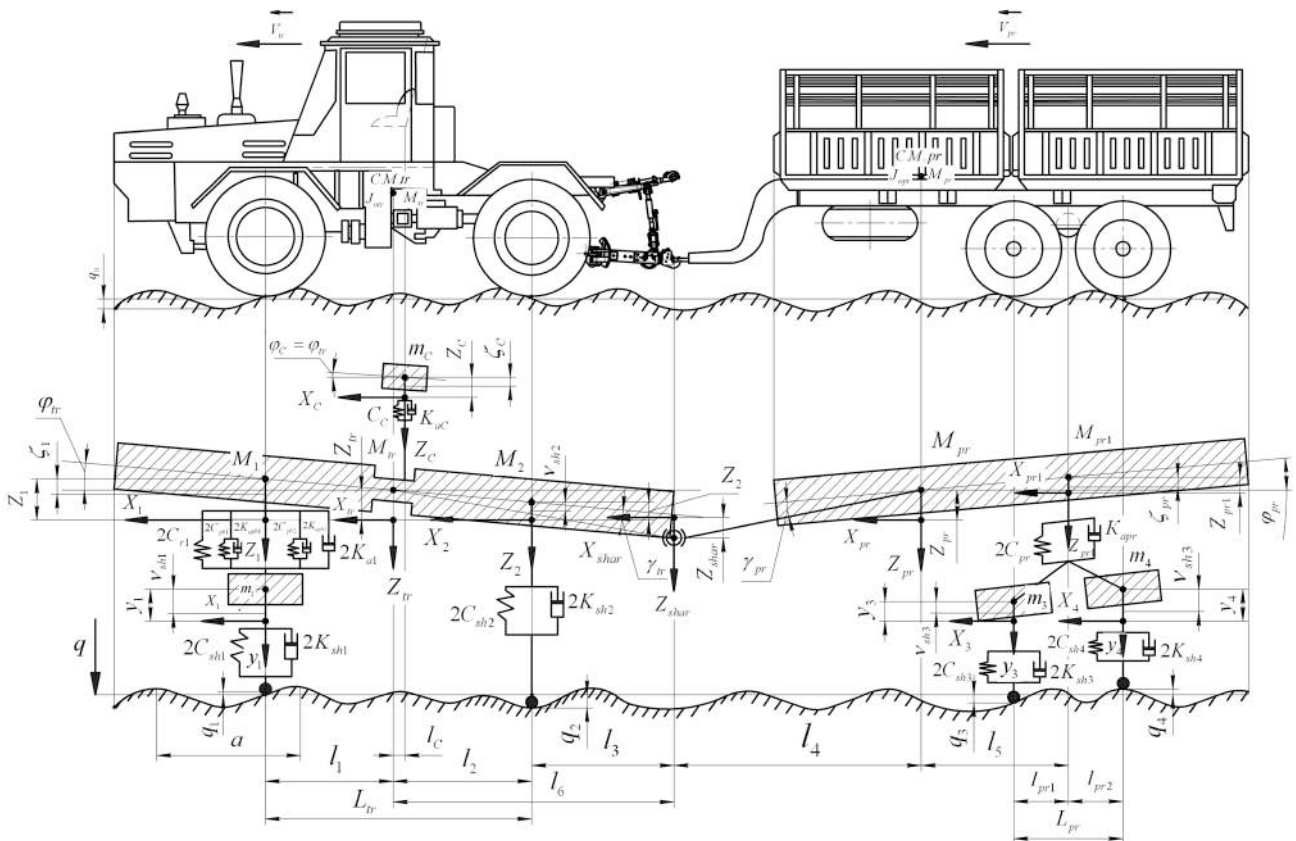


Рис. 1 – Розрахункова схема МТА

Введемо ряд допущень і спрощень, які в значній мірі не впливатимуть на загальний результат моделювання:

– пружними зв'язками між окремими агрегатами МТА знехтуємо. Підресорена маса (разом з кабіною) розглядається як одне ціле абсолютно

тверде тіло;

– вагове навантаження по бортах розподілене рівномірно;

– пружні та демпфіруючі елементи розглядаємо у вигляді безмасової моделі, враховуємо тільки їхню піддатливість і коефіцієнти

демпфірування;

– вважаємо, що машино-тракторний агрегат рухається прямолінійно, профіль міняється синхронно під колесами правого та лівого бортів. Такий режим руху є максимально несприятливий з точки зору зовнішнього впливу;

– контакт шини з опорною поверхнею крапковий, шина котиться без відриву від опорної поверхні;

– розглядаємо коливання остову в межах малих відхилень.

Загальний опис математичного апарату трактора описується наступними диференціальними рівняннями.

– вертикальні переміщення остову, переднього моста та сидіння:

$$M_{tr} \cdot \ddot{Z}_{tr} + 2 \cdot K_{a1} \cdot \dot{\zeta}_1 + 2 \cdot C_{p1} \cdot \zeta_1 + 2 \cdot K_{apb1} \cdot \dot{\zeta}_{pb1} + 2 \cdot K_{apb2} \cdot \dot{\zeta}_{pb2} + 2 \cdot K_{sh2} \cdot \dot{v}_{sh2} + 2 \cdot C_{pb1} \cdot \zeta_{pb1} + 2 \cdot C_{pb2} \cdot \zeta_{pb2} + 2 \cdot C_{sh2} \cdot v_{sh2} + F_{a_{shar}} \cdot \sin(\gamma_{shar}) - C_C \cdot \zeta_C - K_C \cdot \dot{\zeta}_C = 0; \quad (1)$$

$$m_1 \cdot \ddot{y}_1 + 2 \cdot K_{sh1} \cdot \dot{v}_{sh1} + 2 \cdot C_{sh1} \cdot v_{sh1} - 2 \cdot K_{a1} \cdot \dot{\zeta}_1 - 2 \cdot C_{p1} \cdot \zeta_1 - 2 \cdot K_{apb1} \cdot \dot{\zeta}_{pb1} - 2 \cdot K_{apb2} \cdot \dot{\zeta}_{pb2} - 2 \cdot C_{pb1} \cdot \zeta_{pb1} - 2 \cdot C_{pb2} \cdot \zeta_{pb2} = 0; \quad (2)$$

$$m_C \cdot \ddot{Z}_C + C_C \cdot \zeta_C + K_C \cdot \dot{\zeta}_C = 0, \quad (3)$$

де M_{tr} , m_1 , m_C – маса остову, переднього моста та сидіння з водієм трактора; \ddot{Z}_{tr} , \ddot{y}_1 , \ddot{Z}_C – вертикальне прискорення центру мас остова, переднього моста, сидіння водія трактора; C_{p1} , K_{a1} – жорсткість та коефіцієнт демпфірування елементів передньої підвіски трактора; ζ_1 , $\dot{\zeta}_1$ – деформація та швидкість деформації передньої підвіски трактора; C_{pb1} , K_{apb1} та C_{pb2} , K_{apb2} – жорсткість, коефіцієнт демпфірування першого та другого пневматичного пружного елемента передньої підвіски трактора, відповідно; ζ_{pb1} , $\dot{\zeta}_{pb1}$ та ζ_{pb2} , $\dot{\zeta}_{pb2}$ – деформації, швидкість деформації першого та другого пневматичного пружного елемента передньої підвіски трактора; C_{sh1} , K_{sh1} та C_{sh2} , K_{sh2} – жорсткість, коефіцієнт демпфування пневматичних шин переднього та заднього моста трактора; v_{sh1} , \dot{v}_{sh1} та v_{sh2} , \dot{v}_{sh2} – деформації та швидкість деформації пневматичних шин переднього та заднього моста трактора; C_C , K_C – жорсткість та коефіцієнт демпфірування пружного елемента підвіски сидіння водія трактора; ζ_C , $\dot{\zeta}_C$ – деформація та швидкість деформації підвіски сидіння водія трактора; $F_{a_{shar}}$ – сила, що діє в шарнірі; γ_{shar} – кут взаємодії в шарнірі зчпного пристрою трактора з напівприцепом.

Визначення деформацій та її швидкостей базується на врахуванні характеристик мікропрофілю. Основні рівняння, що характеризують деформацію та

її швидкість аналогічні роботі [7].

– горизонтальне переміщення остову:

$$\frac{M_e \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr}}{r_{st2} + v_{sh2}} - (M_{atr1} \cdot g + 2 \cdot C_{sh1} \cdot v_{sh1}) \cdot f - M_{tr} \cdot \ddot{X}_{tr} - (M_{atr2} \cdot g + M_{apr1} \cdot g + 2 \cdot C_{sh2} \cdot v_{sh2}) \cdot f - F_{a_{shar}} \cdot \cos(\gamma_{shar}) = 0, \quad (4)$$

де M_e – ефективний крутний момент двигуна трактора [15,16]; i_{tr} – загальне передаточне число трансмісії трактора; η_{tr} – загальний механічний коефіцієнт корисної дії трансмісії трактора; r_{st} – статичний радіус ведучого колеса трактора; \ddot{X}_{tr} – горизонтальне прискорення центру мас остова трактора; M_{atr1} та M_{atr2} – маса, яка доводиться на передню та задню вісь трактора; g – прискорення вільного падіння; f – коефіцієнт опору кочення коліс трактора; M_{apr1} – маса передньої частини напівпричепа, котра доводиться на задню вісь трактора.

Рівняння (4) справедливе лише при моделюванні роботи трактора з постійно ввімкненим повним приводом та однаковим типорозміром передніх і задніх шин.

– кутове переміщення остову трактора:

$$J_{tr} \cdot \ddot{\varphi}_{tr} + 2K_{apb1} \cdot \dot{\zeta}_{pb1} \cdot (l_7 + l_1) + 2K_{a1} \cdot \dot{\zeta}_1 \cdot l_1 + 2C_{pb1} \cdot \zeta_{pb1} \cdot (l_7 + l_1) + 2C_{pb2} \cdot \zeta_{pb2} \cdot (l_1 - l_8) + 2C_{p1} \cdot \zeta_1 \cdot l_1 + 2K_{apb2} \cdot \dot{\zeta}_{pb2} \cdot (l_1 - l_8) + C_C \cdot \zeta_C \cdot l_C + K_C \cdot \dot{\zeta}_C \cdot l_C - 2K_{sh2} \cdot \dot{v}_{sh2} \cdot l_2 - 2C_{sh2} \cdot v_{sh2} \cdot l_2 - F_{a_{shar}} \cdot \sin(\gamma_{shar}) \cdot l_6 = 0, \quad (5)$$

де J_{tr} – момент інерції, приведений до поперечної вісі, що проходить через центр мас остову трактора; $\ddot{\varphi}_{tr}$ – прискорення кутових коливань остову трактора в вертикальній повздовжній площині відносно поперечної вісі.

Математична модель рухомих вузлів напівпричпного агрегату описується наступними рівняннями.

– вертикальні переміщення рами агрегату та мостів:

$$M_{pr} \cdot \ddot{Z}_{pr} + K_{apr} \cdot \dot{\zeta}_{pr} + 2C_{pr} \cdot \zeta_{pr} - F_{b_{shar}} \cdot \sin(\gamma_{shar}) = 0; \quad (6)$$

$$m_3 \cdot \ddot{y}_3 + 2K_{sh3} \cdot \dot{v}_{sh3} + 2C_{sh3} \cdot v_{sh3} - (K_{apr} \cdot \dot{\zeta}_{pr} + 2C_{pr} \cdot \zeta_{pr}) \cdot \left(\frac{L_{pr} - l_{pr1}}{L_{pr}} \right) = 0; \quad (7)$$

$$m_4 \cdot \ddot{y}_4 + 2K_{sh4} \cdot \dot{v}_{sh4} + 2C_{sh4} \cdot v_{sh4} - (K_{apr} \cdot \dot{\zeta}_{pr} + 2C_{pr} \cdot \zeta_{pr}) \cdot \left(\frac{L_{pr} - l_{pr2}}{L_{pr}} \right) = 0, \quad (8)$$

де M_{pr} , m_3 , m_4 – маса остову, переднього та заднього мостів напівпричепи трактора; \ddot{Z}_{pr} , \ddot{y}_3 , \ddot{y}_4 – вертикальне прискорення центру мас остова, переднього та заднього мостів напівпричепи трактора; C_{pr} та K_{apr} – жорсткість та коефіцієнт демпфірування підвіски напівпричепи трактора; ζ_{pr} та $\dot{\zeta}_{pr}$ – переміщення та швидкість деформації підвіски напівпричепи трактора; C_{sh3} , K_{sh3} та C_{sh4} , K_{sh4} – жорсткість, коефіцієнт демпфування пневматичних шин коліс переднього та заднього мостів напівпричепи трактора; v_{sh3} , \dot{v}_{sh3} та v_{sh4} , \dot{v}_{sh4} – переміщення, швидкість деформації пневматичних шин коліс переднього та заднього мостів напівпричепи трактора; L_{pr} – відстань між мостами напівпричепи трактора; l_{pr1} – відстань від переднього моста напівпричепи трактора до точки кріплення амортизаційного пристрою підвіски напівпричепи; l_{pr2} – відстань від заднього моста напівпричепи трактора до точки кріплення амортизаційного пристрою підвіски напівпричепи.

– горизонтальне переміщення рами агрегату:

$$F_{a_{shar}} \cdot \cos(\gamma_{shar}) - \left(M_{apr2} \cdot \frac{l_{pr2}}{L_{pr}} \cdot g + F_{sh3} \right) \cdot f - \left(M_{apr2} \cdot \frac{l_{pr1}}{L_{pr}} \cdot g + F_{sh4} \right) \cdot f \cdot M_{pr} \cdot \ddot{X}_{pr} = 0, \quad (9)$$

де M_{apr2} – маса задньої частини напівпричепи, котра доводиться на балансирний візок напівпричепу.
– кутове переміщення остову рами агрегату:

$$J_{opr} \cdot \ddot{\phi}_{pr} - K_{apr} \cdot \dot{\zeta}_{pr} \cdot l_5 - 2C_{pr} \cdot \zeta_{pr} \cdot l_5 - F_{b_{shar}} \cdot \sin(\gamma_{shar}) \cdot l_4 = 0, \quad (10)$$

де J_{opr} – момент інерції, приведений до поперечної вісі, що проходить через центр мас остову напівпричепи трактора; $\ddot{\phi}_{pr}$ – прискорення кутових

коливань остову напівпричепи в вертикальній позадвожній площині відносно поперечної вісі.

Результуючі сили $F_{a_{shar}}$ та $F_{b_{shar}}$ є рівноважними ($F_{a_{shar}} = -F_{b_{shar}}$). Для подальших розрахунків прийmemo $F_{a_{shar}} = F_{shar}$ та $F_{b_{shar}} = F_{shar}$.

Сьогодні на більшості світових колісних тракторів при зчипці з напівпричепним агрегатом можуть використовуватися такі пристрої, як гідрофікований крюк, так і маятникова скоба. Але використання маятнкової скоби обмежено вантажопідйомністю агрегату. Тоді при формуванні моделі необхідно враховувати гідрофікований крюк.

При моделюванні зчипки вводиться припущення, що роботу зчипки гідрофікованого крюка та ушка напівпричепи можна представити, як роботу шарніра (рис. 2) [17]. На рис. 2 наведено спрощені схеми машинно-тракторного агрегату з причіп- та напівпричип-цистерн задля формування динамічної моделі в площині позадвожніх коливань.

Силу, що діє в шарнірі зчипного пристрою трактора та напівпричепи можна визначити за формулою

$$F_{shar} = F_{cshar} + F_{ashar}, \quad (11)$$

де F_{cshar} – сила пружності шарніру; F_{ashar} – сила амортизації шарніру.

$$F_{cshar} = C_1 \cdot \Delta_{shar} + C_2 \cdot \Delta_{shar}^2, \quad (12)$$

де C_1 та C_2 – сталі коефіцієнти; Δ_{shar} – деформація шарніра зчипного пристрою трактора та напівпричепи.

$$F_{ashar} = K_{shar} \cdot \dot{\Delta}_{shar}, \quad (13)$$

де K_{shar} – коефіцієнт, демпфування в шарнірі; $\dot{\Delta}_{shar}$ – швидкість деформації шарніру зчипного пристрою трактора та напівпричепи.

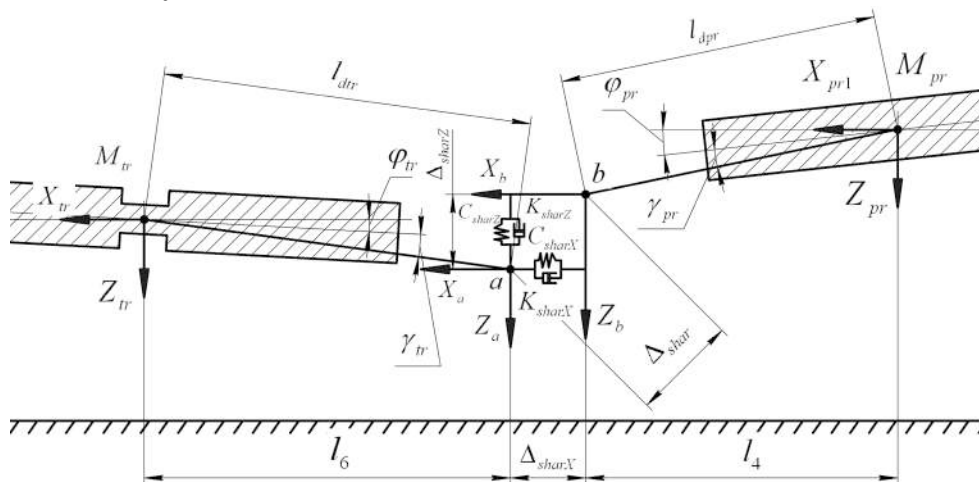


Рис. 2 – Спрощена розрахункова схема колісного трактора та напівпричипного агрегату з урахуванням дії сил на тягово-зчипний пристрій

Зіставивши рівняння (11), (12) та (13) отримаємо загальне рівняння сили, що діє шарнірі тягово-зчіпного пристрою

$$F_{shar} = C_1 \cdot \Delta_{shar} + C_2 \cdot \Delta_{shar}^2 + K_{shar} \cdot \dot{\Delta}_{shar}. \quad (14)$$

Визначивши положення вушок тягово-зчіпного пристрою трактора та напівпричепа, деформацію в шарнірі можна визначити за формулою

$$\Delta_{shar} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (z_a - z_b)^2}, \quad (15)$$

де x_a та x_b – координати горизонтального положення вушка зчіпного пристрою трактора та вушка зчіпного пристрою напівпричепа в повздожній вертикальній площині, відповідно; z_a та z_b – координати вертикального положення вушка зчіпного пристрою трактора та вушка зчіпного пристрою напівпричепа в вертикальній площині, відповідно.

Координати вушок зчіпного пристрою трактора (точка a) та дишла напівпричепа (точка b) можна визначити за формулами

$$z_a = Z_{tr} - l_{dtr} \cdot \sin(\gamma_{tr} + \varphi_{tr}), \quad (16)$$

де Z_{tr} – координата вертикального переміщення центру ваги трактора в повздожній вертикальній площині; l_{dtr} – відстань від центру ваги трактора до точки взаємодії вушка зчіпного пристрою трактора з вушком дишла напівпричепа; γ_{tr} – кут між повздожньою віссю трактора та прямою проведеною через центр ваги трактора та точкою взаємодії вушка зчіпного пристрою трактора з вушком дишла напівпричепа; φ_{tr} – кут нахилу повздожньої вісі трактора відносно центру ваги в повздожній вертикальній площині.

$$z_b = Z_{pr} + l_{dpr} \cdot \sin(\gamma_{pr} + \varphi_{pr}), \quad (17)$$

де Z_{pr} – координата вертикального переміщення центру ваги напівпричепа в повздожній вертикальній площині; l_{dpr} – відстань від центру ваги напівпричепа до точки взаємодії вушка дишла напівпричепа з вушком зчіпного пристрою трактора; γ_{pr} – кут між повздожньою віссю напівпричепа та прямою проведеною через центр ваги напівпричепа та точкою взаємодії вушка дишла напівпричепа з вушком зчіпного пристрою трактора; φ_{pr} – кут нахилу повздожньої вісі напівпричепа відносно центру ваги в повздожній вертикальній площині.

$$x_a = X_{tr} + l_{dtr} \cdot \cos(\gamma_{tr} + \varphi_{tr}), \quad (18)$$

де X_{tr} – координата горизонтального переміщення центру ваги трактора в повздожній вертикальній площині.

$$x_b = X_{pr} - l_{dpr} \cdot \cos(\gamma_{pr} + \varphi_{pr}), \quad (19)$$

де X_{pr} – координата горизонтального переміщення центру ваги напівпричепа в повздожній вертикальній площині.

Кут взаємодії в шарнірі зчіпного пристрою трактора з напівприцепом визначається положенням суміжних вушок

$$\begin{aligned} \gamma_{shar} &= \arctg\left(\frac{z_a - z_b}{x_a - x_b}\right) \text{ if } x_a - x_b > 0 \text{ and } z_a - z_b > 0; \\ \gamma_{shar} &= \pi + \arctg\left(\frac{z_a - z_b}{x_a - x_b}\right) \text{ if } x_b - x_a < 0 \text{ and } z_a - z_b > 0; \\ \gamma_{shar} &= \pi + \arctg\left(\frac{z_a - z_b}{x_a - x_b}\right) \text{ if } x_b - x_a < 0 \text{ and } z_a - z_b < 0; \\ \gamma_{shar} &= \arctg\left(\frac{z_a - z_b}{x_a - x_b}\right) \text{ if } x_a - x_b > 0 \text{ and } z_a - z_b < 0; \\ \gamma_{shar} &= \frac{\pi}{2} \text{ if } x_b - x_a = 0 \text{ and } z_b - z_a > 0; \\ \gamma_{shar} &= -\frac{\pi}{2} \text{ if } x_b - x_a = 0 \text{ and } z_b - z_a < 0. \end{aligned}$$

Визначивши всі вертикальні та горизонтальні сили та моменти, що діють на МТА в вертикальній повздожній площині окремо розглянемо нелінійні складові коливального процесу. При визначенні характеристик пневматичних шин в першу чергу необхідно враховувати їх жорсткість та демпфірування, що обумовлено втратами на внутрішнє тертя. В математичній моделі, що наведена у дослідженні [18], враховується тертя в шині, котре залежить від її конструктивних особливостей. Тому побудова нелінійна характеристика шини базувалась саме на роботі [18].

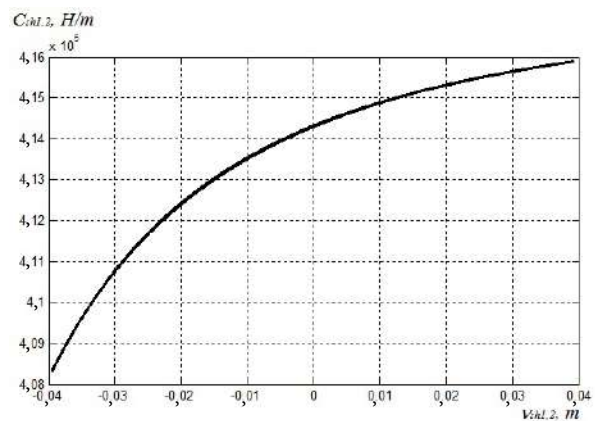


Рис. 3 – Пружні характеристики шини трактора

При моделюванні отримано нелінійну зміну характеристик шини в динамічному просторі повздожнього руху коливальної системи (рис. 3, 4). Як початкові умови бралися характеристики шин трактора 23,1 R26 та напівпричепа КФ – 97 16,5/70 – 18НС 10.

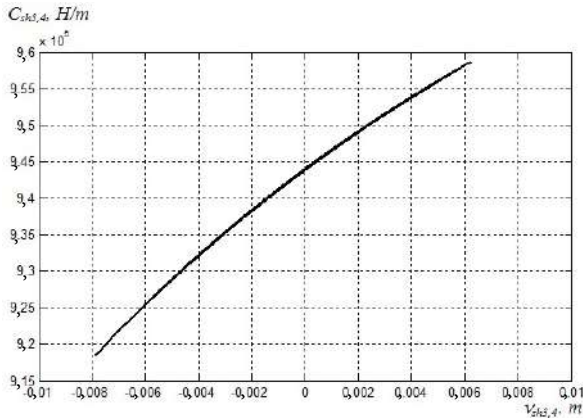


Рис. 4 – Пружні характеристики шини напівпричепи

При розрахунку пневматичних гумово-кордних пружних елементів основною задачею є визначення їх силової характеристики, а саме залежності між навантаженням, що діє на пневматичну ресору та її деформацією, тобто розрахунок її жорсткості [19–23].

При розрахунку робочих характеристик пневматичних пружних елементів, зміну стану робочого газу можна описати рівнянням політропи

$$pV^n = const, \quad (20)$$

де p – абсолютний тиск газу; V – об’єм газу; n – показник політропи.

Величина показника політропи n залежить від

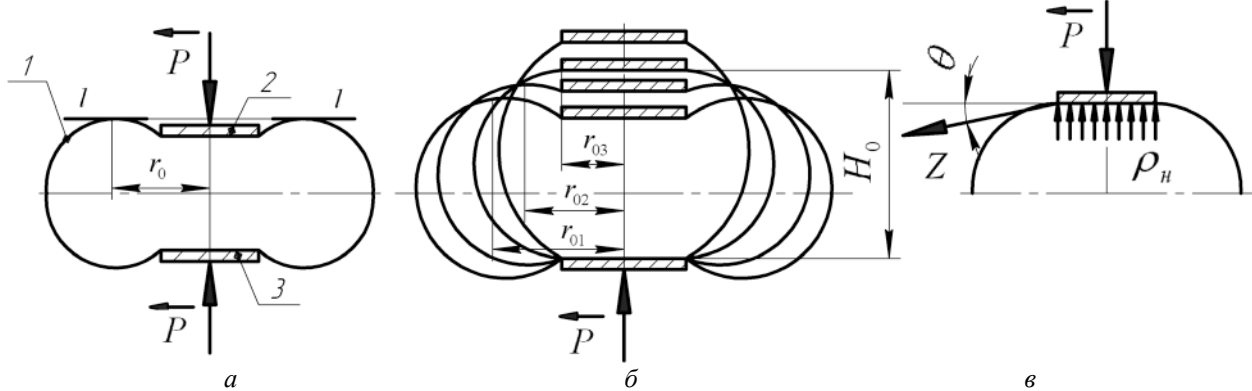


Рис. 5 – Схема навантаження пневматичної ресори з гнучкою гумово-кордовою оболонкою:

a – схема навантаження пневматичного пружного елемента; *б* – зміна конфігурації оболонки при зміні навантаження; *в* – схема зусиль, що діють на фланець; 1 – гнучка гумово-кордна оболонка; 2, 3 – фланці, що створюють замкнутий об’єм; P – осьова сила; $r_0, r_{01}, r_{02}, r_{03}$ – ефективний радіус при різних значеннях осьової сили; H_0 – наведена висота газового стовпа над поришем при статичному навантаженні; Z – сила меридіанного натягу оболонки, підсумована по окружності фланця; p_n – надлишковий тиск

Оскільки тиск в пневматичній ресорі p та об’єм V пов’язані між собою, то абсолютний тиск газу можна визначити з залежності

$$p = p_0 \cdot \left(\frac{V_0 + V_d}{V + V_d} \right)^n, \quad (21)$$

де p_0 – абсолютний тиск газу при статичному навантаженні пневматичної ресори; V_0 – об’єм газу в

умов теплообміну між газом і навколишнім середовищем і є функцією швидкості зміни об’єму газу в оболонці. Для пневматичної ресори можна виділити дві граничні характеристики пружного елемента – адіабатичну й ізотермічну.

При статичному навантаженні, коли швидкість зміни об’єму газу невелика має місце вирівнювання температури між робочим газом та оточуючим середовищем. Показник політропи n відповідає ізотермічному процесу, та дорівнює одиниці. При динамічному навантаженні гумово-кордних пневматичних елементів, що відповідає режимам коливань підвіски на дорожніх нерівностях, швидкість зміни об’єму газу велика. Внаслідок низької теплопровідності гумово-кордної оболонки, теплообмін з оточуючим середовищем ускладнено, теплоємність газу можна вважати постійною, тобто для газу має місце адіабатичний процес. Показник політропи n може бути прийнятий рівним 1,4.

Таким чином, ізотермічний та адіабатичний процеси являються окремими випадками політропного процесу і показник дорівнює $n \in [1; 1,4]$.

Визначаючи силові характеристики, елементарну пневматичну ресору можна представити у вигляді гнучкої оболонки закріпленої проміж двох фланців із замкнутим внутрішнім об’ємом робочого газу. Схему навантаження пневматичного пружного елемента можна представити графічно (рис. 5) [20].

пневматичній ресорі та додатковому резервуарі при статичному навантаженні; V_d – об’єм газу в додатковому резервуарі пневматичної ресори.

З умови рівноваги частини гумово-кордної оболонки, її несуча здатність визначається

$$P = p_n \cdot F = (p - p_a) \cdot F, \quad (22)$$

де F – ефективна площа, обмежена лінією

торкання $l-l$ (рис. 5).

Об'єм газу в пневматичній ресорі та додатковому резервуарі розраховується за допомогою обчислення наступного інтегрального рівняння

$$V = V_0 - \int_0^H F dH. \quad (23)$$

Отже, формулу для визначення силової характеристики пневматичного пружного елемента можна представити у вигляді

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{V_0 + V_d}{V_0 - \Delta V + V_d} \right)^n, \quad (24)$$

де P_0 – статичне навантаження на пневматичну ресору; ΔV – зміна об'єму гумово-кордної оболонки пневматичного елемента при деформуванні підвіски.

$$V_0 = F_0 \cdot H_0, \quad (25)$$

де F_0 – ефективна площа при статичному навантаженні пневматичної ресори (рис. 5); H_0 – наведена висота газового стовпа над поршнем при статичному навантаженні (рис. 5).

З урахуванням виразу (23) зміну об'єму гумово-кордної оболонки пневматичної ресори можна представити в вигляді

$$V = F \cdot (H_0 - \zeta). \quad (26)$$

З урахуванням (25) і (26) вираз (24) отримуємо

$$P = P_0 \cdot \left[\frac{F_0 \cdot H_0 + V_d}{F \cdot (H_0 - \zeta) + V_d} \right]^n. \quad (27)$$

Визначення ефективної площі ускладнено, насамперед, наявністю конструктивної анізотропії структури несучого каркаса пневматичної ресори. Додаткові складнощі виникають у зв'язку з тим, що матеріали, з яких виготовлена оболонка (гума і корд), мають нелінійні характеристики.

Точний розрахунок характеристик гумово-кордних оболонок при великих переміщеннях, навіть у випадку виготовлення їх з ізотропних матеріалів, представляється малоймовірним. У той же час за допомогою деяких простих гіпотез, підтверджуваних експериментальними даними, можна одержати порівняно просте рішення. Для спрощення розрахунку приймаємо наступні спрощення: повна довжина утворюючої оболонки по меридіану від борту до борту, незалежно від величини деформації, приймається незмінною; профіль вільної частини гумово-кордної оболонки, що не прилягає до напрямної частини описується дугою окружності.

Оскільки гумово-кордна оболонка пневматичного пружного елемента представляє собою тіло обертання, то ефективну площу можна обчислити, як функцію ефективного радіуса, тобто відстань від осі обертання до найбільш широкого місця профілю оболонки (рис. 5).

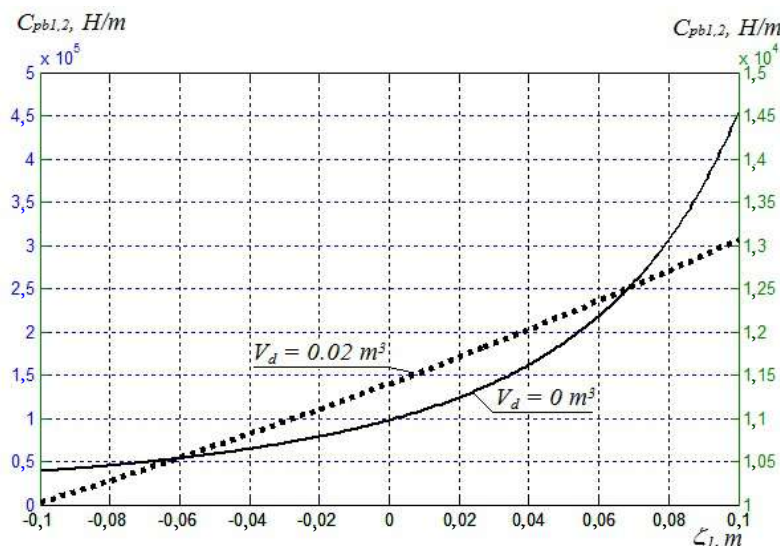


Рис. 6 – Залежність жорсткості пневморесори від деформації передньої підвіски при різних об'ємах газу в додатковому резервуарі

Обчислення жорсткості пневматичної ресори

$$C = \frac{dP}{d\zeta} = \frac{F \cdot P_0 \cdot n \cdot (F_0 \cdot H_0 + V_d)^n}{[F \cdot (H_0 - \zeta) + V_d]^{n+1}}. \quad (28)$$

Окрім пружних характеристик пневматична ресора також має дисипативні властивості. На рис. 6 наведено залежність жорсткості пневморесори від деформації передньої підвіски. Відмітимо, що при $V_d = 0 \text{ м}^3$ значення жорсткості $C_{pb1,2} \in [0; 500]$ кН/м, а при $V_d = 0,02 \text{ м}^3$ – $C_{pb1,2} \in [10; 15]$ кН/м.

Оскільки розміри пневматичних ресор обмежені за умови їх розташування між мостом та підресореною частиною рами транспортного засобу, їх основний об'єм відділений від додаткових резервуарів та сполучається з останніми трубопроводами. Таким чином пневматичний елемент має два об'єми, перемінний робочий та постійний додатковий, між котрими створюється рух потоку повітря на ході стиснення та відбою. В трубопроводах встановлюються елементи, які мають калібровані отвори певного діаметру та створюють пневматичний опір. Принцип пневматичного демпфірування полягає в організації потоку повітря через отвори певного перетину. Це обумовлено миттєвим перепадом тиску, де енергія витрачається на подолання опору руху потоку через дроселі й супутнє утворення вихорів робочого тіла. Змінюючи параметри дросельних пристроїв можна змінювати й дисипативні характеристики пневматичної ресори, які значною мірою впливають на загальні параметри системи.

Для розрахунків обрано колісний трактор 3-го тягового класу з шарнірно-зчленованою рамою, а

напівпричіп з максимальною вантажопідйомністю до 12 т. Як опорну поверхню обрано асфальтобетонне покриття, яке описується наступною функцією [7]

$$y_{gr1} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot X_{tr}}{\Delta\lambda}\right); \quad (29)$$

$$y_{gr2} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(X_{tr} - (l_1 + l_2))}{\Delta\lambda}\right); \quad (30)$$

$$y_{gr3} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(X_{tr} - (l_1 + l_4 + l_5 + l_6 - l_{pr}))}{\Delta\lambda}\right); \quad (31)$$

$$y_{gr4} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(X_{tr} - (l_1 + l_4 + l_5 + l_6 + l_{pr}))}{\Delta\lambda}\right); \quad (32)$$

де A – амплітуда нерівностей; $\Delta\lambda$ – довжина хвилі мікроколивань.

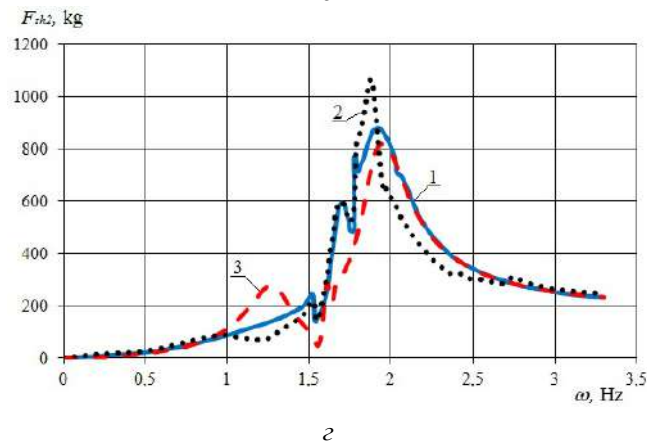
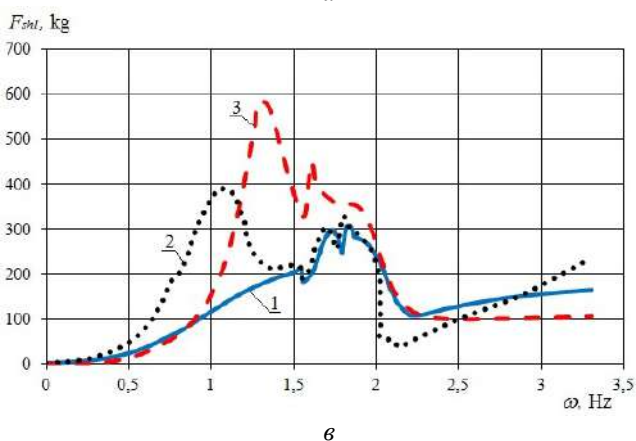
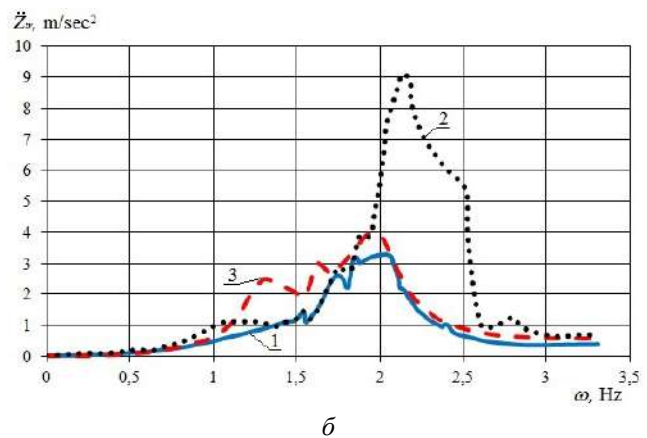
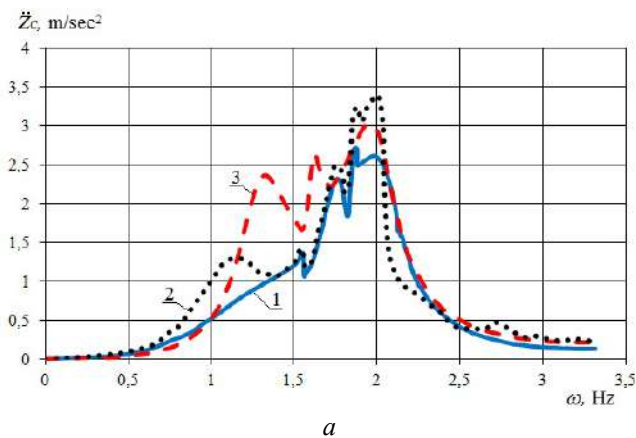


Рис. 7 – Результати моделювання руху трактора з напівпричіпом:

a – прискорення сидіння; *б* – прискорення остову; *в, г* – динамічне навантаження на переднє та заднє колесо відповідно; 1 – пневморесорна з амортизатором; 2 – пневморесорна без амортизатора; 3 – серійна ресорна підвіска

Аналізуючи отримані дані відмітимо, що резонансна зона, залежно від обраного типу системи підресорювання, зміщується.

Це пояснюється нелінійним характером змін жорсткості елементів підвіски колісного трактора та напівпричепа.

Обговорення результатів

Теоретичне дослідження встановило, що

– в зоні $\omega \in [1,2; 1,4]$ Гц найбільший вплив на показники переднього моста трактора;

– в зоні $\omega \in [1,9; 2,2]$ Гц найбільший вплив на

Таблиця 1 – Показники плавності руху та динамічної навантаженості в резонансних зонах переднього моста та остова трактора

Показники	Тип підресорювання переднього моста трактора					
	Пневморесорна з амортизатором		Пневморесорна без амортизатора		Серійна ресорна підвіска	
	Передній міст	Остов	Передній міст	Остов	Передній міст	Остов
\ddot{Z}_w , м/с	0,78	3,38	1,06	8,15	2,55	4,09
\ddot{Z}_c , м/с	0,84	2,6	1,3	3,38	2,4	3,08
F_{sh1} , кг	168,2	272,2	394	331	586	354,7
F_{sh2} , кг	142,2	892,7	130,8	1105,5	291,8	827,7

Що стосується показників динамічної навантаженості на ходові системи (F_{sh1} та F_{sh2} з рис. 7, в, з), то використання системи підресорювання пневморесора з амортизатором також є бажаною.

Перспективою подальших досліджень є встановлення руйнівного характеру впливу динамічного навантаження на окремі деталі ходової системи. Особливо цінним будуть дослідження з перемінною масою напівпричіпного агрегату (цистерни, ґрунтооброблюваного агрегату, розкидачів, тощо) при виконанні транспортних операцій.

Висновки

На основі матеріалів даної роботи сформовано математичну модель поздовжнього руху машинно-тракторного агрегату в горизонтальній та вертикально-кутовій площинах. Дана модель дозволяє при динамічному вирішенні задач оцінювати плавність руху та динамічну навантаженість на ходову систему транспортного засобу.

1. Побудована модель вигідно відрізняється від існуючих врахуванням нелінійних характеристик пружних та дисипативних характеристик підвіски, пневматичних елементів, шин та, особливо, моделюванням процесів в тягово-зчіпному пристрої.

2. Модель має змогу імітувати рух переднього моста колісного трактора трьома видами підресорювання: пневморесорна з амортизатором, пневморесорна без амортизатора, серійна ресорна

характеристики остова колісного трактора.

Найкращі показники по вертикальним прискоренням сидіння та остова трактора (рис. 7, а, б) відбувається при системі підресорювання – пневморесора з амортизатором. Це підтверджується даними з табл. 1.

На вертикальні коливання після резонансної зони остова трактора суттєвий вплив робить вага напівпричепа. Окрім того між резонансними зонами переднього моста та остова трактора спостерігається вплив довантажувальної частини маси напівпричепа.

підвіска. На основі цієї здатності оцінено вплив на плавність руху та динамічну навантаженість ходової системи, а саме:

– у зоні резонансу переднього моста, порівнюючи застосування пневморесори з амортизатором замість серійної підвіски, простежується ефект зменшення частотної характеристики прискорень остова на 63,5 %, а сидіння на 18 %;

– у зоні резонансу остова простежується ефект зменшення частотної характеристики прискорень остова на 58,2 %, а сидіння на 13,4 %.

Список літератури

1. **Кожушко, А. П.** Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату / **А. П. Кожушко** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 34-40. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.05.
2. **Ребров, А. Ю.** Определение рациональной энергонасыщенности пахотного мта на базе колесного сельскохозяйственного трактора / **А. Ю. Ребров, В. Б. Самородов, В. В. Кучков** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 1. – С. 136-140.
3. **Singh, G. K.** Effect of whole-body vibration on vehicle operators: a review / **G. K. Singh** // *International Journal of Science and Research*. – 2014. – № 3(7). – P. 320-323.
4. **Kabir, M. S. N.** Measurement and evaluation of whole body vibration of agricultural tractor operator / **M. S. N. Kabir, S. O. Chung, Y. J. Kim, N. S. Sung, S. J. Hong** //

- International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2017. – № 10(1). – P. 248-255. – doi: 10.3965/j.ijabe.20171001.2113.
5. **Servadio, P.** Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors / **P. Servadio, A. Marsili, N. P. Belfiore** // *Biosystems engineering*. – 2007. – № 97(2). – P. 171-180. – doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.004.
 6. **Scarlett, A. J.** Whole-body vibration: evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors / **A. J. Scarlett, J. S. Price, R. M. Stayner** // *Journal of terramechanics*. – 2007. – № 44 (1). – P. 65-73. – doi: 10.1016/j.jterra.2006.01.006.
 7. **Кожушко, А. П.** Моделивання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом / **А. П. Кожушко, О. Л. Григор'єв** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 27 (1303). – С. 34-61.
 8. **Шуляк, М. Л.** Підвищення ефективності експлуатації енергонасиченого трактора в агрегаті з сільськогосподарською машиною змінної маси / **М. Л. Шуляк** // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 148. – С. 280-286.
 9. **Лебедев, А. Т.** Забезпечення стійкості і керованості сільськогосподарських агрегатів із змінною масою / **А. Т. Лебедев, М. П. Артьомов, М. Л. Шуляк, І. А. Лебедев** // *Технічні науки : зб. Наук. Праць ВНАУ*. – 2015. – Т. 1. – № 1 (89). – С. 57-62.
 10. **Zheng, H.** Research on simulation and control of differential braking stability of tractor semi-trailer / **H. Zheng, J. Hu, S. Ma** // *SAE Technical Paper*. – 2015. – 2015-01-2842. – doi: 10.4271/2015-01-2842.
 11. **Кальченко, Б. І.** Плавність руху як складова динаміки трактора : монографія / **Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. П. Кожушко, А. Г. Мамонтов**. – Харків: ФОП Панов А. М., 2018. – 164 с.
 12. **Ovsyannikov, S.** Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities / **S. Ovsyannikov, E. Kalinin, I. Kolesnik** // *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. – Springer, Cham. – 2018. – P. 307-317. – doi: 10.1007/978-3-030-19756-8_28.
 13. **Nguyen, V. N.** Effects of tire inflation pressure and tractor velocity on dynamic wheel load and rear axle vibrations / **V. N. Nguyen, S. Inaba** // *Journal of Terramechanics*. – 2011. – Т. 48. – № 1. – P. 3-16. – doi: 10.1016/j.jterra.2010.09.001.
 14. **Торакці, М.** Stress analysis on transmission gears of a rotary tiller using finite element method / **М. Торакці, К. Н. Çelik, D. Yılmaz, I. Akıncı** // *Journal of the Faculty of Agriculture of Akdeniz University (Turkey)*. – 2008. – № 2. – P. 155-160.
 15. **Dumenko, P.** Formation and study of static and dynamic characteristics of electronically controlled diesel engine / **P. Dumenko, S. Kravchenko, A. Prokhorenko, D. Talanin** // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. – 2019. – № 2. – P. 12-23. – doi: 10.2478/lpts-2019-0009.
 16. **Прохоренко А. О.** Універсальний електронний регулятор дизеля на основі електричного сервоактуатора / **А. О. Прохоренко, С. С. Кравченко, Д. Є. Самойленко, І. М. Карягін, Д. С. Таланін** // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2018. – №. 1. – С. 31-39. – doi: 10.20998/0419-8719.2018.1.06.30.
 17. **Волонцевич, Д. О.** К вопросу моделирование подсистемы тягач – прицеп – подвеска – движитель шарнирно-сочлененных колесных машин / **Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, В. М. Качур** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 26-30.
 18. **Ребров, А. Ю.** Идентификация тракторных сельскохозяйственных шин / **А. Ю. Ребров** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 8 (1117). – С. 19-25.
 19. **Зубарев, А. В.** Об аддитивности статической нагрузочной характеристики пневматического амортизатора с резинокордной оболочкой / **А. В. Зубарев, С. П. Бобров, Е. С. Аникин, Ю. П. Комаров, В. А. Щепетков** // *Омский научный вестник*. – 2016. – № 2 (146). – С. 28-32.
 20. **Hrubel, M. H.** Influence of characteristics of wheeled vehicle suspension on its road-holding along curved stretches of track / **M. H. Hrubel, M. B. Sokil, R. A. Nanivskyi** // *Science & Military Journal*. – 2014. – № 1(9). – P. 15-19.
 21. **Zheng, E.** Prediction of the vibration characteristics for wheeled tractor with suspended driver seat including air spring and MR damper / **E. Zheng, Y. Fan, R. Zhu, Y. Zhu, J. Xian** // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2016. – № 30 (9). – P. 4143-4156. – doi: 10.1007/s12206-016-0826-x.
 22. **Anthonis, J.** Design and evaluation of a low-power mobile shaker for vibration tests on heavy wheeled vehicles / **J. Anthonis, P. Kennes, H. Ramon** // *Journal of terramechanics*. – 2000. – № 37(4). – P. 191-205. – doi: 10.1016/S0022-4898(00)00006-9.
 23. **Giordano D.** Comfort efficiency of the front axle suspension in off-road operations of a medium-powered agricultural tractor / **D. Giordano, D. Facchinetti, D. Pessina** // *Contemporary Engineering Sciences*. – 2015. – № 8(28). – P. 1311-1325. – doi: 10.12988/ces2015.56186.

References (transliterated)

1. **Kozhushko, A.** Analysis of design features trailed and semitrailer tanks as part of the machine-tractor unit. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **5** (1330), 34-40, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.
2. **Rebров, A. Yu., Samorodov, V. B., Kuchkov, V. V.** Opredelenie ratsionalnoy energonasyischennosti pahotnogo MTA na baze kolesnogo selskohozyaystvennogo traktora [Determination of rational energy saturation of arable MTU based on a wheeled agricultural tractor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2011, **1**, 136-140.
3. **Singh, G. K.** Effect of whole-body vibration on vehicle operators: a review. *International Journal of Science and Research*, 2014, **3**(7), 320-323.
4. **Kabir, M. S. N., Chung, S. O., Kim, Y. J., Sung, N. S., Hong, S. J.** Measurement and evaluation of whole body vibration of agricultural tractor operator. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, **10**(1), 248-255, doi: 10.3965/j.ijabe.20171001.2113.
5. **Servadio, P., Marsili, A., Belfiore, N. P.** Analysis of driving seat vibrations in high forward speed tractors. *Biosystems engineering*, 2007, **97**(2), 171-180, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.004.
6. **Scarlett, A. J., Price, J. S., Stayner, R. M.** Whole-body

- vibration: evaluation of emission and exposure levels arising from agricultural tractors. *Journal of terramechanics*, 2007, **44** (1), 65-73, doi: 10.1016/j.jterra.2006.01.006.
7. **Kozhushko, A. P., Hryhoriev, A. L.** Modeliuvannya poviazanykh kolyvan kolisnoho traktora ta tsysterny z ridynoiu na priamomu shliakhu zi skladnym relieфом [Modeling of coupled oscillations of wheeled tractors and tanks with liquid on a straight road with difficult terrain]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2018, **27** (1303), 34-61.
 8. **Shulyak, M. L.** Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii enerhonasychenoho traktora v ahrehati z silskohospodarskoiu mashynoiu zminnoi masy [Increasing the efficiency of operation of the energy-intensive tractor in the unit with an agricultural machine of variable mass]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka [Bulletin of the Kharkiv State National Technical University of Agriculture of the name of Peter Vasilenko]*, 2014, **148**, 280-286.
 9. **Lebedev, A. T., Artyomov, M. P., Shuliak, M. L., Lebedev I. A.** Zabezpechennia stiikosti i kerovanosti silskohospodarskykh ahrehativ iz zminnoiu masoiu [Ensuring the stability and handling of agricultural units with variable weight]. *Tekhnichni nauky : zb. Nauk. Prats VNAU [Engineering Sciences: Coll. Science. Against VNAU]*, 2015, **1** (89), 57-62.
 10. **Zheng, H., Hu, J., Ma, S.** Research on simulation and control of differential braking stability of tractor semi-trailer. *SAE Technical Paper*, 2015, 2015-01-2842, doi: 10.4271/2015-01-2842.
 11. **Kalchenko, B. I., Rebrov, O. Yu., Kozhushko, A. P., Mamontov A. G.** Plavnist' rukhu yak skladova dynamiky traktora : monografiya [Smoothness of motion as a component of tractor dynamics: monograph]. Kharkov, FOP Panov A.M. Publ., 2018, 164.
 12. **Ovsyannikov, S., Kalinin, E., Kolesnik, I.** Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*, 2018, 307-317, doi: 10.1007/978-3-030-19756-8_28.
 13. **Nguyen, V. N., Inaba, S.** Effects of tire inflation pressure and tractor velocity on dynamic wheel load and rear axle vibrations. *Journal of Terramechanics*, 2011, **1** (48), 3-16, doi: 10.1016 / j.jterra.2010.09.001.
 14. **Торакчи, М., Çelik, K. H., Yılmaz, D., Akıncı, I.** Stress analysis on transmission gears of a rotary tiller using finite element method. *Journal of the Faculty of Agriculture of Akdeniz University (Turkey)*, 2008, **2**, 155-160.
 15. **Dumenko, P., Kravchenko, S., Prokhorenko, A., Talanin, D.** Formation and study of static and dynamic characteristics of electronically controlled diesel engine. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2019, **2**, 12-23, doi: 10.2478/lpts-2019-0009.
 16. **Prokhorenko, A. O., Kravchenko, S. S., Samoilenko, D. E., Karyagin, I. M., Talanin, D. S.** Universal'nyy elektronnyy rehulyator dyzelya na osnovi elektrychnoho servo aktuatory [Universal electronic diesel regulator based on electric servoactuators]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]*, 2018, **1**, 31-39, doi: 10.20998/0419-8719.2018.1.06.30.
 17. **Volontsevich, D. O., Karpenko, V. A., Kachur, V. M.** K voprosu modelirovaniya podsystemy tyagach – pritsep – podveska – dvizhetel sharnirno-sochlenennykh kolesnykh mashin [To the question of the modeling of the subsystem tractor – trailer – suspension – mover articulated articulated wheeled vehicles]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2004, **2**, 26-30.
 18. **Rebrov, A. Yu.** Identifikatsiya traktornykh silskohozyaystvennykh shin [Tractor agricultural tire identification]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*, 2015, **8** (1117), 19-25.
 19. **Zubarev, A. V., Bobrov, S. P., Anikin, E. S., Komarov, Yu. P., Shchepetkov, V. A.** Ob additivnosti staticheskoy nagruzochnoy kharakteristiki pnevmaticheskogo amortizatora s rezinokordnoy obolochkoy [On the additivity of the static load characteristic of a pneumatic shock absorber with a rubber-cord shell]. *Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2016, **2** (146), 28-32.
 20. **Hrubel, M. H., Sokil, M. B., Nanivskiy, R. A.** Influence of characteristics of wheeled vehicle suspension on its road-holding along curved stretches of track. *Science & Military Journal*, 2014, **1**(9), 15-19.
 21. **Zheng, E., Fan, Y., Zhu, R., Zhu, Y., Xian, J.** Prediction of the vibration characteristics for wheeled tractor with suspended driver seat including air spring and MR damper. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, **30**(9), 4143-4156, doi: 10.1007/s12206-016-0826-x.
 22. **Anthonis, J., Kennes, P., Ramon, H.** Design and evaluation of a low-power mobile shaker for vibration tests on heavy wheeled vehicles. *Journal of terramechanics*, 2000, **37**(4), 191-205, doi:10.1016/S0022-4898(00)00006-9.
 23. **Giordano, D., Facchinetti, D., Pessina, D.** Comfort efficiency of the front axle suspension in off-road operations of a medium-powered agricultural tractor. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, **8**(28), 1311-1325, doi: 10.12988/ces2015.56186.

Відомості про авторів (About Authors)

Мамонтов Анатолій Геннадійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автомобіле- та тракторобудування; м. Харків; Україна; ORCID: 0000-0002-5586-2113; e-mail: monkhotkar@gmail.com.

Anatoliy Mamontov – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of Car and Tractor Industry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5586-2113; e-mail: monkhotkar@gmail.com.

Кожушко Андрій Павлович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування; м. Харків; Україна; ORCID: 0000-0002-4725-5911; e-mail: Andreykozhusko7@gmail.com.

Andriy Kozhushko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associated Professor at the Department of Car and Tractor Industry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4725-5911; e-mail: Andreykozhusko7@gmail.com.

Ребров Олександр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування; м. Харків; Україна; ORCID: 0000-0002-1312-9992; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

Oleksiy Rebrov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associated Professor at the Department of Car and Tractor Industry; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1312-9992; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мамонтов, А. Г. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом / **А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, О. Ю. Ребров** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 29-41. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.04.

Please cite this article as:

Mamontov, A., Kozhushko, A., Rebrov, O. Formation of a mathematical model of the dynamic loading of tractor suspension with semi-trailer. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 29–41, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.04.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Мамонтов, А. Г. Формирование математической модели динамической нагруженности ходовой системы колесного трактора с полуприцепным агрегатом / **А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, А. Ю. Ребров** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 29-41. – doi: 10.20998/2413-4295.2019.01.04.

АННОТАЦИЯ Приведена математическая модель продольно-углового движения машинно-тракторного агрегата на базе колесного трактора и полуприцепного агрегата. Модель позволяет учитывать нелинейность изменения упругих и диссипативных характеристик подвески, пневматических элементов, а также колебательное движение в шарнире тягово-прицепного устройства. Предложен математический алгоритм для определения нелинейной характеристики пневматической рессоры в зависимости от деформации передней подвески колесного трактора. Поскольку сегодня главными трендами современного тракторостроения является увеличение эксплуатационной скорости движения и наращивания масс в грузоперевозках, то исследования в области плавности движения считается актуальным. Это обусловлено влиянием растущих возмущающих факторов, возникающих при увеличении скоростей движения на показатели качественные подвески транспортного средства. Установлена закономерность изменения динамической нагруженности ходовой системы колесного трактора при выполнении транспортных работ с полуприцепным агрегатом в зависимости от агротехнического состояния опорной поверхности и наличия зазора в тягово-сцепном устройстве. Установлено влияние различных систем подрессоривания переднего моста колесного трактора на показатели плавности движения (среднеквадратичное ускорение рамы и сиденья трактора) и динамической нагруженности на ходовую систему колесного трактора. Целесообразность данных исследований обосновано наличием как практической, так и теоретической ценности. Практическая ценность работы заключается в том, что она позволяет еще на этапе проектирования или модернизации колесного трактора с полуприцепом выявить динамические составляющие, которые негативным образом будут влиять на плавность движения. Теоретическая значимость заключается в предоставлении математического алгоритма для возможности оценки динамической нагруженности ходовой системы машинно-тракторного агрегата. Что дает определенные эффекты от внедрения в области надежности.

Ключевые слова: трактор колесный; полуприцеп; ходовая система; динамическая нагруженность; пневморессоры; сцепное устройство.

Надійшла (received) 25.08.2019

УДК 001:330.102.312;004.8

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.05

INVENTION ENGINEERING – A NOVEL APPROACH TO SUPPORT CREATIVITY IN ENGINEERING, PRACTICE AND RESEARCH

J. NOENNIG*, S. WIESENHUETTER

Faculty of Architecture, TU Dresden, Dresden, GERMANY

*e-mail: joerg.noennig@tu-dresden.de

ABSTRACT In engineering education, practice and research, a central issue is how traditional thought patterns can be broken up by creative tools and impulses. This paper presents the outline for a method that supports the discovery of new sources of inspiration in search fields such as literature, film, fine art or music, and enables engineers to generate design alternatives in high speed and quantity. For this end, techniques from the design sciences, creativity and innovation research as well as digital information and knowledge technologies are reviewed and integrated into the conceptual approach of Invention Engineering. The aim is to develop and validate a process which provides artistic inspirations to engineers and is supported by algorithmic creativity and association tools. Thus four separate research challenges need to be addressed: a) Analysis of creative processes in engineering disciplines (inspiration, association, ideation, innovation) and their comparison to “Creative Patterns” of other domains; In addition, visions of the past and the socio-technical framework conditions of their implementation need to be explored in order to establish a model for the validation of the overall Invention Engineering method; b) Development of an “Inspiration Mining” method for obtaining creative impulses from non-engineering areas (e.g. literature, music, visual arts, film et al.); Respective search results need to be referenced with a semantic model and processed in a knowledge system (Idea Bank), which – as a kind of associative search engine – provides input for idea generation; c) Translation of established creativity and innovation research into an “Idea Engine” for generation of a large number of productive ideas; This can be done through combinatorial algorithms and methods of remote association, textual and visual-spatial idea matrices, that provide a fertile basis for radically new design and engineering ideas; d) Integration of the separate methods into a coherent process and validation of the creative support effect of the generated innovations by means of engineering psychology. This can be done on the basis of selected visionary ideas from the past (e.g. science fiction) that can be simulated on the basis of their associative foundations and implementation probabilities.

Keywords: Invention Engineering; Creative Technique; Innovation Management

ВИНАХІДНИЦЬКА ІНЖЕНЕРІЯ - НОВИЙ ПІДХІД ДО ПІДТРИМКИ ТВОРЧОСТІ В ІНЖЕНЕРІЇ, ПРАКТИЦІ ТА ДОСЛІДЖЕННІ

Дж. Р. НОННІГ, С. ВІСЕНХЬЮТЕР

Факультет архітектури, ТУ Дрезден, Дрезден, НІМЕЧЧИНА

АНОТАЦІЯ В галузі інженерної освіти, практики та досліджень центральним питанням є те, як традиційні моделі мислення можуть бути розбиті творчими інструментами та імпульсами. В статті представлено схему методу, який підтримує відкриття нових джерел натхнення у таких сферах пошуку, як література, кіно, образотворче мистецтво чи музика, і дозволяє інженерам створювати альтернативні дизайни швидко та у великій кількості. З цією метою методи з дизайнерських наук, творчості та інновацій, а також цифрової інформації та технологій пізнань переглядаються та інтегруються в концептуальний підхід винахідницької інженерії. Метою є розробка та підтвердження процесу, який забезпечує художнє натхнення інженерам та підтримується алгоритмічними інструментами творчості та асоціації. Таким чином, потрібно вирішити чотири окремі проблеми дослідження: а) аналіз творчих процесів в інженерних дисциплінах (натхнення, асоціація, ідеї, інновації) та їх порівняння з «креативними моделями» інших областей; крім того, необхідно вивчити бачення минулого та соціально-технічні рамкові умови їх впровадження, щоб встановити модель для валідації загального методу винахідницької інженерії; б) розробка методу «Натхнення для натхнення» для отримання творчих імпульсів з інженерних галузей (наприклад, літератури, музики, образотворчого мистецтва, кіно та ін.); відповідні результати пошуку повинні посилатися на семантичну модель і оброблятися у системі знань (Банк Ідеї), яка, як своєрідна асоціативна пошукова система, дає внесок для генерування ідеї; в) переклад встановлених досліджень творчості та інновацій у «двигун ідеї» для генерації великої кількості продуктивних ідей; це можна зробити за допомогою комбінаторних алгоритмів та методів віддаленої асоціації, текстових та візуально-просторових матриць ідей, які дають плодотворну основу для радикально нових дизайнерських та інженерних ідей; г) інтеграція окремих методів у цілісний процес і перевірка ефекту творчої підтримки створених інновацій засобами інженерної психології; це можна зробити на основі відібраних уявних ідей із минулого (наприклад, наукової фантастики), які можуть бути змодельовані на основі їх асоціативних основ та ймовірностей реалізації.

Ключові слова: винахідницька інженерія; креативні методи; інноваційний менеджмент

Introduction

The history and practice of engineering disciplines such as architectural or civil engineering show that the potential of new possibilities from the introduction of new

techniques or materials remained unused for a long time, because it was based on old thinking and design patterns that did not meet the potential of the new technical achievements. New design rules and applications are usually discovered slowly and often by chance. In

contrast, visionary artists and works of art such as Kasimir Malevich's suprematist paintings, Italo Calvino's "Invisible Cities" or Fritz Lang's science-fiction movie "Metropolis" have anticipated radical innovations in an astonishing manner, and have become sources of inspiration for the engineers and designers. The Art Nouveau, Italian Futurismo or poststructuralist architecture were inspired by such external sources.

Our central issue in this paper therefore is how traditional thought patterns in engineering can be broken up by creative tools and impulses. We aim at the development of a novel method, which should enable engineers and designers to open up non-specialist sources of inspiration, to generate and evaluate radically other design and construction ideas in high speed and quantity. We assume that new sources of inspiration can be discovered in search fields such as literature, film, fine art or music, and be made useful for the generation of ideas. Their creative processes, structural models and formal languages are to be accommodated as alternatives to otherwise path-dependent patterns of thinking in design and engineering.

Objectives

In order to explore new conceptual paths and to increase the output rate of ideas and innovations, we review approaches and techniques from the design sciences [1,2], creativity and innovation research [3-5] as well as digital information and knowledge technologies [6,7], in this paper, in order to prepare the merger into a comprehensive method of Invention Engineering. Doing so, we fundamentally ask how radical new ideas are coming into the world of design and engineering, and what creative impulses and processes are central for the discovery of radically new approaches in engineering, design, and constructions. The attempt to harness artistic works as inspiration for engineering by way of algorithmic methods (e.g. semantic search, machine learning) has not been undertaken so far and has high exploration and venture character.

Methods

The paradigm shifts in civil and architectural engineering that result from radical innovations in material and construction only take place over long periods of time. Due to the large construction and utilization periods of artefacts like buildings, only slow innovation cycles and low reproduction rates are possible. Engineering disciplines thus have a particular need to accelerate the research and innovation process, to purposefully break up established thought patterns and systematically exploit new impulses and resources of ideas. Above all, there are in creativity and innovation research as well as the attempts to scientifically depict the design and construction process ("design sciences") pioneering approaches that should be pursued further for this purpose.

Research on creativity, established in the cognitive and behavioural sciences sees as critical creativity factors in individuals and groups the "out of box" breaking-up of existing thought patterns [5] and the semantic linkage of distant objects (Remote Association) [8]. In addition, many of the established learning and creativity techniques such as Syntectics [4,9] are based on principles of exploration and the ability to use disturbances productively [10].

Innovation research, which, in contrast to creativity research, primarily investigates the effects of inventions and discoveries in socio-technical systems, emphasizes the principles of openness and disruption as central factors. Classical innovation research emphasized the moment of creative disturbance, even destruction [11]. More statistically oriented and dependency-oriented scenario methods for technology forecast (Kondratjew cycles, Delphi method) [12] also see external impulses and disturbances as decisive trigger for surprising new technical solutions. Such, the open innovation approach describes how valuable impulses in innovation ecosystems are based on the absorption of external innovations [13], through targeted involvement of end and extreme users [14] as well as through hacking processes [7]. They also show the risks arising from path dependencies and non-observance of external inventions ("not invented here" syndrome) [15].

Especially in ICT and software development, these findings have led to innovation processes such as Agile Development or Scrum, which ensure high creative output as well as successful implementation in markets and organizations. They enable the rapid uptake of external impulses and an "agile" realignment of the development processes. This responsiveness and openness is a fundamental condition of the innovation power of the current ICT and software industry. In the civil and architectural engineering and the related construction industry, however, comparable procedures are lacking.

Although the added value of disturbances, openness and agility has long been recognized in the field of creativity and innovation research, they are not very present and hardly used in the engineering sciences. The few existing approaches to scientifically comprehend the creative process for the creation of complex technical artifacts are based on the systematic solution of complex engineering problems by rule-based problem solving strategies e.g. the decomposition of complex problems into less complex problems [1,2]. Well-established design science methods such as Genrich Altshuller's TRIZ [16], Christopher Alexander's Pattern Language [17] or Richard Buckminster Fuller's Synergetics have at best led to practical computer aided invention tools, but not to surprisingly new solutions.

More aggressive innovation is created at the interface between Open Innovation and Design Science: the Design Thinking process pursues external and transdisciplinary impulses to generate disruptive product and solution visions. Going beyond this result-oriented approach again, more recent concepts of Art Thinking try

to use results-oriented, exploratory processes instead of the forced product and visions of Design Thinking [18].

On technical level, such approaches are broadly employed in the research and innovation departments of large technology companies (Fig. 1) where they are increasingly being supported by “intelligent” interaction and analysis technologies. Here established creativity and innovation methods are enhanced with AI and database procedures, thus forming a Digital Innovation Engineering approach.



Fig. 1 –Fujitsu Digital Future Center: Pattern Library of creative solutions to support systematic generation of innovations

While broadly established methods such as Pattern Language or Design Thinking do not stand up to scientific validation, the more robust Design Science methods (Simon, Altshuller) only lead to incremental, path-dependent innovations or optimizations. Discipline-bound within their respective technical and conceptual possibilities, they do not lead to radical innovation leaps, as it may be expected from the discovery of groundbreaking new engineering materials or processes. The thinking of “hard” engineering can hardly integrate the success factors of radical innovation (openness, disruption, agility), while on the other hand a translation of the methods of innovation and creativity research into engineering-scientific conception processes and their support by advanced digital tools is rarely attempted.

Results

It is necessary to provide non-specialist sources of inspiration, e.g. from the visual arts, literature, music, film, science fiction, etc., as a source of inspiration in order to achieve radically different design and construction ideas. In the future, engineers need to have valid algorithmic procedures upon which - after careful description of their particular challenges - they can receive inspiring impulses and associations, leading them towards radically new approaches in design work, experimentation, modelling, etc. In order to effectively explore new ideas paths and to generate and evaluate new visions in high speed and quantity, structured concept-finding processes are necessary. Therefore we aim to fuse

useful approaches and principles from the fields of design sciences, design and art thinking as well as creativity and innovation research into a method of Invention Engineering. Advanced methods of machine learning and creativity-oriented data analysis open up excellent opportunities to use previously unknown sources of knowledge for engineers, and for inspiring radical new conceptual paths [19].

As basic elements of the intended method we see a digital AI assistant based on bot functionality which proposes decision paths. Also, we have conceived a tool for creating associative as well as logically linked idea matrices in which users can freely navigate and ideas "grow" quickly.

Our schematic future research outline combines approaches and techniques, as outlined above, from the design sciences, creativity and innovation research as well as digital information and knowledge technologies. The concrete goal of developing and validating a process supported by algorithmic creativity and association tools for the provision of artistic inspirations in order to discover radically new engineering and constructions approaches may be broken down in following four separate research challenges, each of which targets at a single method.

This research challenge aims at the analysis of creative processes (inspiration, association, ideation, innovation) commonly used in engineering disciplines, and the comparison to "patterns of thought" of other domains and open creativity techniques. In addition, visions of the past and the socio-technical framework conditions of their implementation need to be explored in order to establish a model for the validation of the overall Invention Engineering method.

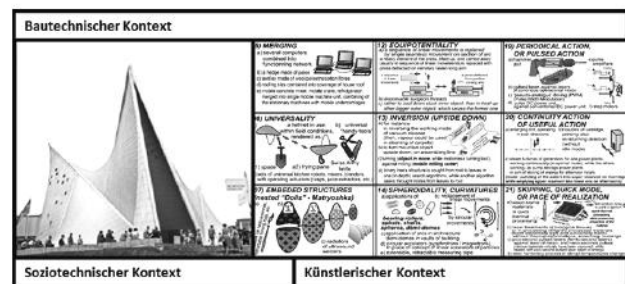
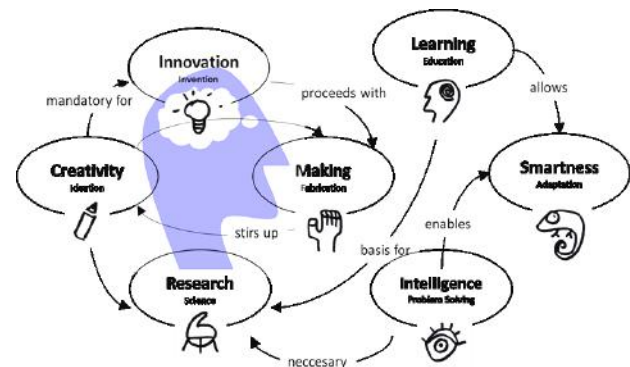


Fig. 2 – Creative Patterns: Investigating the structures of creative thought and inventions

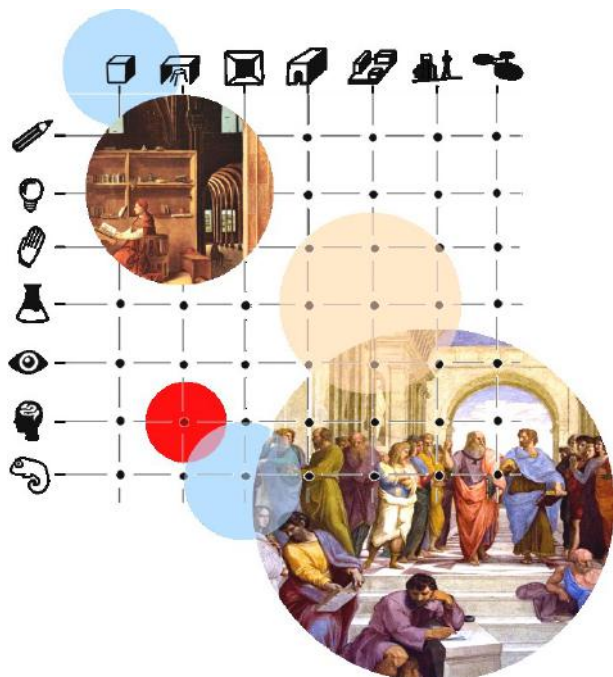


Fig.3 – Inspiration Mining: Searching inspirational objects with ML algorithms

This challenge comprises the development of techniques and technologies for use in areas outside engineering such as literature, music, visual arts, film et al. To be able to discover ideas and concepts that can provide creative impulses for engineering research, IT technologies such as text mining, web crawling or machine learning are available [21,22]. Respective search results need to be referenced with a semantic model and processed in a knowledge system (Idea Bank), which – as a kind of associative search engine – provides input for idea generation.

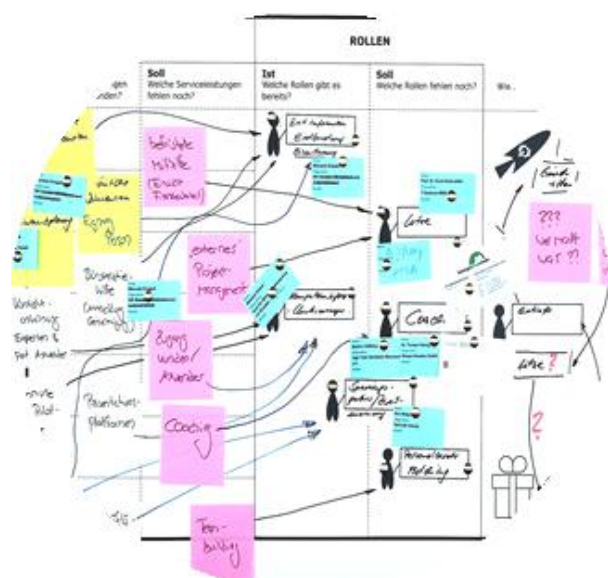


Fig.4 – Idea Engine: Creative ideation based on Inspirational Matrices

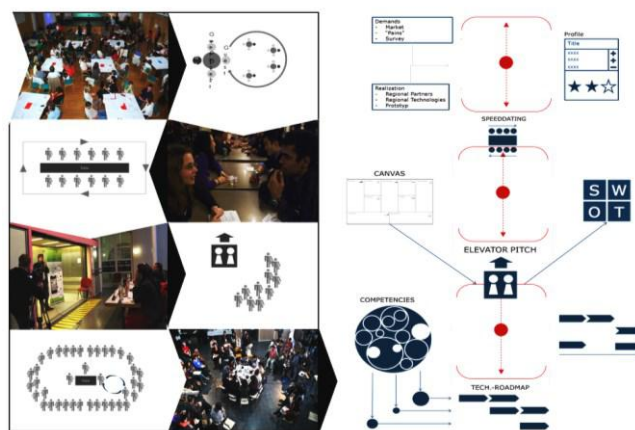


Fig.5 – Integration: Establishing a coherent process and methodology

Built on established creativity and innovation and IT and AI technologies, an association-assisting tool needs to be developed that helps engineers to quickly generate a large number of productive ideas and to evaluate them. With combinatorial algorithms and methods of remote association, textual and visual-spatial idea matrices can be developed that provide a fertile basis for radically new design and engineering ideas [20].

The fourth research challenge addresses the integration of above mentioned processes and tools into a coherent methodology and process. Their validation is possible on the basis of selected visionary ideas from the past (e.g. science fiction) that can be simulated on the basis of their associative foundations and implementation probabilities. The creative supportive effect of the method and the realization potential of the generated innovations need to be assessed with means from fields like engineering psychology.

Conclusion

The initial research program sketched above will be pursued over the next months and years by the WISSENSARCHITEKTUR Laboratory of Knowledge Architecture at TU Dresden within larger research consortia and projects. We target at implementing and testing a complete Invention Engineering Process at TU Dresden within the next two years, and explore the research and innovation potential of the approach also beyond the scope of engineering education, research and practice.

Список літератури

1. **Simon, H.** The Sciences of the Artificial / **H. Simon.** MIT Press, 1969. – 248 p.
2. **Hacker, W.** Zeitweilige Gruppenarbeit für Prozessinnovationen: Grundlagen, Organisation und Wirkungen / **W. Hacker** // **I. Jöns (Ed.), Erfolgreiche Gruppenarbeit. Konzepte, Instrumente, Erfahrungen,** Wiesbaden: Springer Gabler. – 2016. – P. 25-35.
3. **Gurtner, S.** Programming Creativity: Methods for Empowering Innovation in Interdisciplinary Teams / **S.**

- Gurtner, A. Jannack, J. Noennig** // *Proc. of Int. Forum for Knowledge Asset Dynamics*, Zagreb, Croatia. – 2013. – P. 1858-1869.
4. **Koestler, A.** The divine spark: The creative act in art and science / **A. Koestler**. – Bern: Scherz. – 1966. – 143 p.
 5. **Gordon, W.** Synectics: The development of creative capacity / **W. Gordon**. – Harper, New York 1961. – 180 p.
 6. **Stelzle, B., Noennig, J. R., Jannack, A.** Co-Design and Co-Decision: Decision Making on Collaborative Design Platforms / **B. Stelzle, J. R. Noennig, A. Jannack** // *Procedia Computer Science 112 Proc. of 21st Int. Conf. in Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES2017)*. – Marseille. – 2017. – P. 2435-2444.
 7. **Gregory, R. W.** Heuristic theorizing: Proactively generating design theories / **R. W. Gregory, J. Muntermann** // *Information Systems Research*. – 2014. – 25(3). – P. 639-653. – doi: 10.1287/isre.2014.0533.
 8. **Lee, C. S.** A measure of creativity or intelligence? Examining internal and external structure validity evidence of the remote associates test / **C. S. Lee, A. C. Huggins, D. J. Therriault** // *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. – 2014. – 8 (4). – P. 446-460. – doi: 10.1037/a0036773.
 9. **Koziolek, S.** Design by analogy: Synectics and knowledge acquisition network / **S. Koziolek** // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2017. – P.259-273. – doi:10.1007/978-3-319-50938-9_27.
 10. **Koch, L.** Imaginationen der Störung. Ein Konzept in: Behemoth / **L. Koch, T. Nanz, J. Pause** // *A Journal on Civilisation, Imaginationen der Störung*. – 2016. – Vol. 9, № 1. – doi: 10.6094/behemoth.2016.9.1.885.
 11. **Schumpeter, S.** Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung / **S. Schumpeter**. – Berlin, 1912. – 216 p.
 12. **Kondratjew, N.** Die langen Wellen der Konjunktur / **Kondratjew, N.** // *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik*. – 1926. – Band 56. – P. 573-609.
 13. **Chesbrough, H.** Open Innovation. The New Imperative for Creating and Profiting from Technology / **H. Chesbrough**. – Harvard Business School Press, Boston, 2003. – 230 p.
 14. **Hippel, E.** Lead Users. A Source of novel product concepts / **E. Hippel** // *Management Science*. – 1986. – Vol. 32. – P. 791-805.
 15. **Katz, K.** Investigating the Not Invented Here (NIH) Syndrome: a look at the performance, tenure and communication patterns of 50 R&D project groups / **K. Katz, T. Allen** // *R&D Management*. – 1982. – Vol. 12, 1. – P. 7-19.
 16. **Chou, J. R.** An ideation method for generating new product ideas using TRIZ, concept mapping, and fuzzy linguistic evaluation techniques / **J. R. Chou** // *Advanced Engineering Informatics*. – 2014. – 28(4). – P. 441-454. – doi: 10.1016/j.aei.2014.06.006.
 17. **Najari, A.** From Altshuller to Alexander: Towards a Bridge between Architects and Engineers / **A. Najari, S. Dubois, M. Barth, M. Sonntag** // *Procedia CIRP*. – 2016. – 39. – P. 119-124. – doi: 10.1016/j.procir.2016.01.176.
 18. **Schiума, G.** Arts catalyst of creative organisations for the fourth industrial revolution, Schiuma, Giovanni / **G. Schiuma** // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. – 2017. – P. 2199-8531.
 19. **Dahlstedt, P.** Big Data and Creativity / **P. Dahlstedt** // *European Review*. – 2019. – 27 (3). – P. 411-439. – doi:10.1017/S1062798719000073.
 20. **Oltețeanu, A.-M.** Computationally resurrecting the functional Remote Associates Test using cognitive word associates and principles from a computational solver / **A.-M. Oltețeanu, M. Schöttner, S. Schuberth** // *Knowledge-Based Systems*. – 2019. – 168. – P. 1-9. – doi: 10.1016/j.knosys.2018.12.023.
 21. **Song, H.** Design-by-analogy: Exploring for analogical inspiration with behavior, material, and component-based structural representation of patent databases / **H. Song, K. Fu** // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2019. – 19 (2). – № 021014. – doi: 10.1115/1.4043364.
 22. **Chen, L.** An artificial intelligence based data-driven approach for design ideation / **L. Chen, P. Wang, H. Dong, F. Shi, J. Han, Y. Guo, P.R.N. Childs, J. Xiao, C. Wu** // *Journal of Visual Communication and Image Representation*. – 2019. – 61. – P. 10-22. – doi: 10.1016/j.jvcir.2019.02.009.

References (transliterated)

1. **Simon, H.** The Sciences of the Artificial. MIT Press, 1969, 248.
2. **Hacker, W.** Zeitweilige Gruppenarbeit für Prozessinnovationen: Grundlagen, Organisation und Wirkungen. I. Jöns (Ed.), *Erfolgreiche Gruppenarbeit. Konzepte, Instrumente, Erfahrungen*, 2016, 25-35.
3. **Gurtner, S., Jannack A., Noennig, J.** Programming Creativity: Methods for Empowering Innovation in Interdisciplinary Teams. *Proc. of Int. Forum for Knowledge Asset Dynamics*, 2013, Zagreb, Croatia, 1858-1869.
4. **Koestler, A.** The divine spark: The creative act in art and science. Bern: Scherz, 1966, 143.
5. **Gordon, W.** Synectics: The development of creative capacity. Harper, New York, 1961, 180.
6. **Stelzle, B., Noennig, J. R., Jannack, A.** Co-Design and Co-Decision: Decision Making on Collaborative Design Platforms. *Proc. of 21st Int. Conf. in Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES2017)*. Marseille, 2017, 2435-2444.
7. **Gregory, R.W., Muntermann, J.** Heuristic theorizing: Proactively generating design theories. *Information Systems Research*, 2014, 25 (3), 639-653, doi: 10.1287/isre.2014.0533.
8. **Lee, C. S., Huggins, A. C., Therriault, D. J.** A measure of creativity or intelligence? Examining internal and external structure validity evidence of the remote associates test. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 2014, 8 (4), 446-460, doi: 10.1037/a0036773.
9. **Koziolek, S.** Design by analogy: Synectics and knowledge acquisition network. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2017, 259-273, doi:10.1007/978-3-319-50938-9_27.
10. **Koch, L., Nanz, T., Pause, J.** Imaginationen der Störung. Ein Konzept. *Behemoth. A Journal on Civilisation, Imaginationen der Störung*, 2016, 9, 1, doi: 10.6094/behemoth.2016.9.1.885.
11. **Schumpeter, S.** Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Berlin, 1912, 216.
12. **Kondratjew, N.** Die langen Wellen der Konjunktur. In: *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik*, 1926, 56, 573-609.
13. **Chesbrough, H.** Open Innovation. The New Imperative for Creating and Profiting from Technology. *Harvard Business School Press*. Boston, 2003, 230.
14. **Hippel, E.** Lead Users. A Source of novel product concepts. *Management Science*, 1986, 32, 791-805.

15. **Katz, K., Allen, T.** Investigating the Not Invented Here (NIH) Syndrome: a look at the performance, tenure and communication patterns of 50 R&D project groups. *R&D Management*, 1982, **12**, 1, 7-19.
16. **Chou, J. R.** An ideation method for generating new product ideas using TRIZ, concept mapping, and fuzzy linguistic evaluation techniques. *Advanced Engineering Informatics*, 2014, **28**(4), 441-454, doi: 10.1016/j.aei.2014.06.006.
17. **Najari, A., Dubois, S., Barth, M., Sonntag, M.** From Altshuller to Alexander: Towards a Bridge between Architects and Engineers. *Procedia CIRP*, 2016, **39**, 119-124, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.176.
18. **Schiama, G.** Arts catalyst of creative organizations for the fourth industrial revolution, Schiama, Giovanni. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2017, 2199-8531.
19. **Dahlstedt, P.** Big Data and Creativity. *European Review*, 2019, **27** (3), 411-439, doi: 10.1017/S1062798719000073.
20. **Oltețeanu, A.-M., Schöttner, M., Schuberth, S.** Computationally resurrecting the functional Remote Associates Test using cognitive word associates and principles from a computational solver. *Knowledge-Based Systems*, 2019, **168**, 1-9, doi: 10.1016/j.knsys.2018.12.023.
21. **Song, H., Fu, K.** Design-by-analogy: Exploring for analogical inspiration with behavior, material, and component-based structural representation of patent databases. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2019, **19** (2), 021014, doi: 10.1115/1.4043364.
22. **Chen, L., Wang, P., Dong, H., Shi, F., Han, J., Guo, Y., Childs, P.R.N., Xiao, J., Wu, C.** An artificial intelligence based data-driven approach for design ideation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, **61**, 10-22, doi: 10.1016/j.jvcir.2019.02.009.

About authors

Joerg Rainer Noennig – Prof. Dr.-Eng., Director of Wissensarchitektur - Laboratory of Knowledge Architecture, Faculty of Architecture, TU Dresden, Dresden, Germany; e-mail: joerg.noennig@tu-dresden.de.

Джорґ Рейнер Нонніґ – професор, доктор наук, директор Віссенса́рхітектур – Лабораторії архітектурних знань, факультет архітектури, ТУ Дрезден, Дрезден, Германія; e-mail: joerg.noennig@tu-dresden.de.

Sebastian Wiesenhuetter – Research Associate, Wissensarchitektur – Laboratory of Knowledge Architecture, Faculty of Architecture, TU Dresden, Dresden, Germany; e-mail: sebastian.wiesenhuetter@tu-dresden.de

Себастьян Вісенхьютер – науковий співробітник, Віссенса́рхітектур – Лабораторія архітектурних знань, факультет архітектури, ТУ Дрезден, Дрезден, Германія; e-mail: sebastian.wiesenhuetter@tu-dresden.de.

Please cite this article as:

Noennig, J., Wiesenhuetter, S. Invention engineering – a novel approach to support creativity in engineering, practice and research. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **1**, 42–47, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.05.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Нонніґ, Дж. Вісенхьютер, С. Винахідницька інженерія – новий підхід до підтримки творчості в інженерії, практиці та дослідженні / **Дж. Нонніґ, С. Вісенхьютер** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 42-47. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Нонниг, Дж. Визенхьютер, С. Изобретательская инженерия – новый подход к поддержке творчества в инженерии, практике и исследовании / **Дж. Нонниг, С. Визенхьютер** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 42-47. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.05.

АННОТАЦИЯ В области инженерного образования, практики и исследований центральным вопросом является то, как традиционные модели мышления могут быть разбиты творческими инструментами и импульсами. В статье представлена схема метода, который поддерживает открытие новых источников вдохновения в таких сферах поиска, как литература, кино, изобразительное искусство или музыка, и позволяет инженерам создавать альтернативные дизайны быстро и в большом количестве. С этой целью методы из дизайнерских наук, творчества и инноваций, а также цифровой информации и технологий познаний пересматриваются и интегрируются в концептуальный подход изобретательской инженерии. Целью является разработка и подтверждение процесса, который обеспечивает художественное вдохновение инженерам и поддерживается алгоритмическими инструментами творчества и ассоциации. Таким образом, нужно решить четыре отдельные проблемы исследования: а) анализ творческих процессов в инженерных дисциплинах (вдохновение, ассоциация, идеи, инновации) и их сравнение с "креативными моделями" других областей; кроме того, необходимо изучить видение прошлого и социально-технические рамочные условия их внедрения, чтобы установить модель для валидации общего метода изобретательской инженерии; б) разработка метода «Вдохновение для вдохновения» для получения творческих импульсов по инженерным областям (например, литературы, музыки, изобразительного искусства, кино и др.) соответствующие результаты поиска должны ссылаться на семантическую модель и обрабатываться в системе знаний (Банк Идеи), которая, как своеобразная ассоциативная поисковая система, дает вклад для генерирования идеи; в) перевод установленных исследований творчества и инноваций в «двигатель идеи» для генерации большого количества продуктивных идей; это можно сделать с помощью комбинаторных алгоритмов и методов удаленной ассоциации, текстовых и визуально-пространственных матриц идей, которые дают плодотворную основу для радикально новых дизайнерских и инженерных идей; г) интеграция отдельных методов в целостный процесс и проверка эффекта творческой поддержки созданных инноваций средствами инженерной психологии; это можно сделать на основе отобранных воображаемых идей из прошлого (например, научной фантастики), которые могут быть смоделированы на основе их ассоциативных оснований и вероятностей реализации.

Ключевые слова: изобретательская инженерия; креативные методы; инновационный менеджмент

Поступила (received) 08.08.2019

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ УСТОЙЧИВОСТИ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОБРУШЕНИЯХ РАССЛОИВШЕЙСЯ ТОЛЩИ

С. В. ПОДКОПАЕВ¹, И. В. ИОРДАНОВ¹, Ю. И. СИМОНОВА¹, А. В. ПОЛОЖИЙ¹,
А. В. КОРОЛЬ², Г. Э. БОЙЧЕНКО³

¹Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Донецкая обл., УКРАИНА

²ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, УКРАИНА

³ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», УКРАИНА

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

АННОТАЦИЯ Целью работы является определение условий устойчивости боковых пород в угленосном массиве вмещающем выработку, при поддержании кровли угольного пласта податливой опорой. Для достижения поставленной цели были выполнены исследования с привлечением основных положений классической механики, теории упругости и колебаний, а также лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой. В результате обработки экспериментальных моделей, учитывались геометрические параметры, отражающие в определенные моменты времени, величину возможного отклонения центра масс балки от положения равновесия a , (м) при ударе и мгновенного сжатия податливой опоры ΔX , (м). Доказано, что после силового воздействия падающей породы на балку, при определенной жесткости податливой опоры, с учетом продолжительности удара t_{y0} , (с) и промежутка времени, в течение которого перемещение балки достигает максимальных значений Δt , (с), т.е. когда $t_{y0} = \Delta t$, (с) и $a \approx \Delta X$, (м), моделируемая система теряет свою устойчивость. При таком взаимодействии балки с податливой опорой, по мере увеличения жесткости охранного сооружения, когда a , (м) и ΔX , (м), принимают минимальные значения, вероятность разрушения боковых пород и их обрушение в выработку, увеличивается. Выполненный комплекс исследований показывает, что при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи, для снижения уровня травматизма горнорабочих и повышения устойчивости кровли угольного пласта в рабочей части лавы и позади очистного забоя, целесообразно применение податливых опор из дробленой породы, обоснованного гранулометрического состава.

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

STUDY ON MODELS OF STABILITY OF SIDE SPECIES AT EXTREME DAMAGE OF A DIVIDED THICKNESS

S. PODKOPEV¹, I. YORDANOV¹, Y. SIMONOVA¹, A. POLOZHIIY¹, A. KOROL²,
H. BOICHENKO³

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

²PSP "Dobropolskoye Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC ", Dobropolye, UKRAINE

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

ABSTRACT The aim of the work is to determine the stability conditions of the lateral rocks in the coal-bearing massif of the host excavation, while maintaining the roof of the coal seam with a supple support. To achieve this goal, research was carried out using the basic principles of classical mechanics, the theory of elasticity and vibrations, as well as laboratory studies on models from equivalent materials, when the roof of the coal seam was presented in the form of a beam with a flexible support. As a result of testing the experimental models, geometric parameters were taken into account, reflecting at certain points in time, the magnitude of the possible deviation of the center of mass of the beam from the equilibrium position a , (m) upon impact and instantaneous compression of the compliant support ΔX , (m). It is proved that after the force of a falling rock on a beam, with a certain rigidity of the pliable support, taking into account the duration of the impact t_{sp} , (s) and the period of time during which the beam moves to maximum values Δt , (s), i.e. when $t_{sp} = \Delta t$, (s) and $a \approx \Delta X$, (m), the simulated system loses its stability. In this interaction, the beam with a malleable support, as the rigidity of the security structure increases, when a , (m) and ΔX , (m) take on minimal values, the probability of destruction of lateral rocks and their collapse into production, increases. A complex of studies shows that in case of sudden collapses of stratified rock strata, to reduce the level of injuries to miners and increase the stability of the coal seam roof in the working part of the lava and behind the stope, it is advisable to use malleable crushed rock supports with reasonable particle size distribution.

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

Введение

Внезапность обрушений расслоившейся породной толщи, приводящих к завалам горных выработок, является одной из особенностей

разработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях. Аварии, произошедшие при обрушениях боковых пород в угольных шахтах, как правило, сопровождаются крупным материальным ущербом и невозможной утратой человеческой

жизни. Изучение природы обрушений, их влияние на состояние боковых пород и, на основе этого, разработка эффективных мероприятий, направленных на сохранение выработок в эксплуатационном состоянии, будет способствовать созданию безопасных условий труда горнорабочих в глубоких шахтах.

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках, зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первоначально следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Наряду с этим, изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине позволило установить, что характер его опасных проявлений, определяется не только напряженным состоянием массива осадочных горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке [1].

Опыт работы шахт Донбасса, разрабатывающих угольные пласты крутонаклонного и крутого залегания показывает, что при традиционных способах управления горным давлением полным обрушением или удержанием кровли на кострах, применяемая в очистном забое крепь, не способна противостоять сдвигению расслоившихся боковых пород в окрестности поддерживаемых горных выработок. Применяемые в настоящее время способы охраны штреков различными конструкциями из дерева (кусты из стоек, органый ряд) или целиками угля, не всегда обеспечивают надежную защиту выработок от опасных проявлений горного давления, в т. ч. при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи.

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвижений боковых пород в окрестности горных выработок и создает зоны устойчивых пород позади очистного забоя [2-4], а значит, существенно изменить геомеханическую обстановку в углепородном массиве, вмещающем выработки, можно за счет применения закладки выработанного пространства, что позволит обеспечить устойчивость пород кровли разрабатываемого угольного пласта позади очистного забоя и будет способствовать повышению безопасности труда горнорабочих в подземных условиях.

Постановка задачи

Целью работы является определение условий устойчивости боковых пород в углепородном массиве, вмещающем выработки, при поддержании кровли угольного пласта податливой опорой, при действии динамических нагрузок.

Для достижения поставленной цели были выполнены аналитические исследования с применением основных положений классической механики, теории упругости и колебаний, а так же лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, в которых породы кровли угольного пласта рассматривали в виде балки с податливой опорой из дробленой породы, различного гранулометрического состава.

В результате обработки экспериментальных моделей, после силового воздействия падающей породы на балку, учитывались геометрические параметры, отражающие в определенные моменты времени, величину перемещения балки и мгновенного сжатия податливой опоры, на которую опирается балка.

Материалы и результаты исследований

В реальных условиях разработки угольных пластов, при различных способах управления кровлей в лаве и охраны штреков, сохранность горных выработок обеспечивается за счет устойчивости пород непосредственной кровли угольного пласта, как основного грузонесущего элемента подземного сооружения.

Согласно гипотезе балок [5], можно предположить, что в очистном забое, кровля угольного пласта деформируется и разрушается подобно балкам. Исходя из этого, рассмотрим кровлю угольного пласта, как двухопорную балку АС длиной L , (м), на которую падает груз массой m , (кг). Балка имеет в т.А, неподвижную шарнирную опору, а в т.В- подвижную шарнирную опору, расстояние между которыми $2l$, (м). К консольному концу С балки, длиной l , (м), приложена сосредоточенная вертикальная сила P , (Н) (рис.1).

Известно [6-8], что любая динамическая нагрузка, вынуждает деформируемую систему перемещаться, а значит, задача исследования устойчивости изучаемого объекта, состоит в определении усилий и перемещений, порожденных инерционными силами и статической компонентой внешнего воздействия, когда система совершает движение, т.е. изгибается.

После силового воздействия падающей породы на балку, в моделируемой системе проявляются две активные силы: одна от силы тяжести балки Q , (Н), приложенная в середине и, вторая, сосредоточенная сила P , (Н), приложенная в конце балки.

На рис.1 видно, что в опоре В реакция направлена навстречу силы P , (Н). В опоре А, балка, под действием силы P , (Н), стремится повернуться вокруг опоры В. Однако, опора А препятствует этому, а значит, реакция опоры А, направлена вниз.

Проверку правильности определения реакций, согласно [9], осуществим по выражению, когда

$$\sum P_y = -R_A + R_B - P = -\frac{1}{2}P + \frac{3}{2}P - P = 0. \quad (1)$$

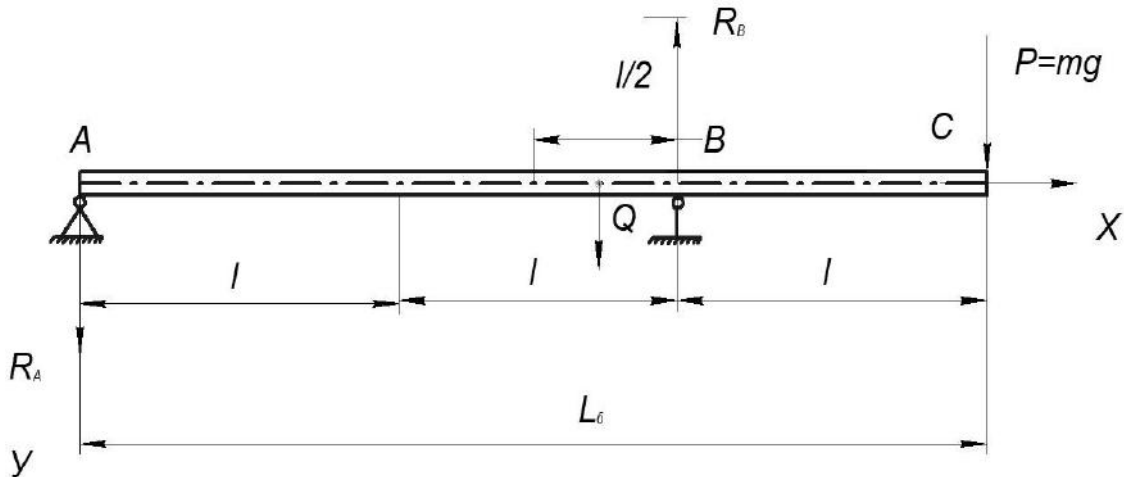


Рис.1 – Схема к определению параметров устойчивости кровли угольного пласта, представленных в виде балки: Q - вес балки, (Н); P - сила, действующая на консольный конец балки, (Н); A, B - опоры балки, R_A, R_B - соответственно, реакция опоры A и B ; $L_0=3l$ - длина балки, (м), m -масса падающего груза, (кг)

При динамическом поведении такой системы, когда на балку падает груз определенной массы m , (кг), может произойти разрушение балки. Определим максимальное значение массы падающего груза на балку, при которой происходит потеря устойчивости моделируемой системы.

Рассмотрим сумму моментов сил, относительно опоры B и приравняем ее нулю, т.е.

$$\sum m_B(P) = Q \cdot 1 - P \cdot 2 = 0, \quad (2)$$

откуда

$$P = \frac{Q}{2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что при $P > \frac{Q}{2}$, происходит потеря устойчивости моделируемой системы и балка разрушается.

Считаем, что падающий на балку груз, известной массы m , (кг), имеет скорость V , (м/с). Определим минимальную массу балки m_0 , (кг), при которой скорость груза U , (м/с) после удара, будет равна нулю.

Обозначим через V_0 , (м/с) скорость балки до удара, а через U_0 , (м/с)- после удара и, используя гипотезу Ньютона [9,10], определим значение коэффициента восстановления при ударе из следующего соотношения

$$k = \frac{U_0 - U}{V - V_0} = \frac{U_0 - 0}{V - 0} = \frac{U_0}{V}, \quad (4)$$

откуда

$$U_0 = kV, \quad (5)$$

где $V = \sqrt{2gH}$; H - высота падения груза, м.

Для решаемой задачи, закон сохранения количества движения [9], принимает вид

$$mV + m_0V_0 = mU + m_0U_0. \quad (6)$$

Учитывая то, что $V_0 = 0$ и $U=0$, имеем

$$mV = m_0kV \quad (7)$$

Следовательно, когда выполняется соотношение

$$m_0 \geq \frac{mV}{kV} = \frac{m}{k}, \quad (8)$$

скорость падающего груза после удара по балке, будет равна нулю.

Для смягчения действия динамических нагрузок и ограничения величины перемещений изучаемого объекта, при силовом воздействии падающей породы на балку, для обеспечения устойчивого состояния моделируемой системы, рекомендуются применение податливых опор [6,7,9,11,12].

Определим величину ударной силы $P_{уд}$, (Н), при падении груза массой m , (кг) на балку, с различной высоты H , (м), но с учетом того, что балка имеет различные опорные связи. Так, согласно второго закона Ньютона [7,9]

$$m\bar{d}V = \bar{P}dt. \quad (9)$$

С использованием теоремы о среднем [9], считаем что величина ударной силы определяется как

$$P_{уд} = \frac{mV}{t_{уд}}. \quad (10)$$

где $t_{уд}$ - продолжительность удара, с.

Для надежной работы моделируемой деформируемой системы необходимо, чтобы все ее элементы были устойчивы. В рассматриваемых условиях, при изучении устойчивости пород кровли, когда проявляется действие динамических нагрузок, величину критических напряжений, можно определить

исходя из формулы Эйлера [6,7]. Однако ее применение имеет ряд ограничений, которые должны учитывать момент потери устойчивости балки.

Пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки $\lambda_{пр}$, величина которой зависит от ее физико-механических свойств, т.е.

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (11)$$

где E - модуль упругости балки, Н/м²; $[\sigma_{изг}]$ -предел прочности балки на изгиб, Н/м².

С учетом выражения (11), формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости балки, когда выполняется соотношение

$$\sigma_{max} > \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (12)$$

где σ_{max} - максимальные напряжения, возникающие в исследуемом сечении балки при действии внешней силы, Н/м².

С учетом выражений (11) и (12), разрушение балки будет происходить в результате изгиба.

В результате силового воздействия падающей породы на балку, уравнение движения балки, с учетом рекомендаций [13,14], в моделируемой системе, можно представить в виде

$$x = a \sin(kt + \varphi) + \frac{mg}{c} \quad (13)$$

где $\frac{mg}{c}$ - величина статического сжатия податливой опоры, м; c - жесткость податливой опоры, Н/м.

Очевидно то, что максимальное перемещение балки будет при ΔX , (м), т.е. когда выполняется условие

$$\sin(kt + \varphi) = 1, \quad (14)$$

а

$$(kt + \varphi) = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

В этом случае, время Δt , (с), в течение которого перемещение балки достигает максимальных значений, определяется по выражению

$$\Delta t = \frac{1}{k} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right), \quad (16)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{c}{m+m_6}} \quad (17)$$

Продолжительность удара $t_{уд}$, (с), можно определить, как в [10], по выражению

$$t_{уд} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x}{g}} \quad (18)$$

В результате удара груза по балке, которая опирается на податливую опору, происходит сжатие опоры. При падении груза известной массы, максимальная величина мгновенного сжатия опоры, равна сумме ее статического сжатия $\frac{mg}{c}$, (м) и амплитуды гармонических колебаний a , (м), т.е.

$$\Delta X = \frac{mg}{c} + a \quad (19)$$

В данном случае, параметр a , представляет собой возможное максимальное отклонение центра масс балки в моделируемой деформируемой системе от положения равновесия.

Известно [7,9], что когда $t=0$,

$$x_0 = -\frac{mg}{c}, \quad (20)$$

а

$$\dot{x} = \frac{m}{m+m_6} \sqrt{2gH} \quad (21)$$

где m_6 -масса балки, кг.

Учитывая то, что

$$a \sin \alpha = -\frac{mg}{c}, \quad (22)$$

а

$$ak \cos \alpha = \sqrt{2gH} \frac{m}{m+m_6}, \quad (23)$$

после соответствующих математических преобразований, получим

$$a = \sqrt{\frac{m^2 g^2}{c^2} + 2gH \frac{m^2}{c(m+m_6)}} \quad (24)$$

Тогда, с учетом вышеизложенного, максимальная величина мгновенного сжатия податливой опоры ΔX , (м), после падения породного блока массой m , (кг) на балку, определяется как

$$\Delta X = \frac{mg}{c} + \sqrt{\frac{m^2 g^2}{c^2} + 2gH \frac{m^2}{c(m+m_6)}} \quad (25)$$

В теории колебаний, при анализе собственных колебаний изучаемого объекта, часто применяют спектральные методы, сущность которых заключается в замене исследуемых физических величин, таких как внешняя сила и жесткость, их спектрами. Знание динамической жесткости податливого основания, позволяет определить плотность амплитудного спектра движений, возникающих в деформируемой системе после удара. Однако от времени удара, зависит не плотность амплитудного спектра, а фазовый спектр [13,15-17].

При исследовании фазовых соотношений, между действием внешней силы и откликом податливого основания, в моделируемой системе – податливой опоры, ранее было установлено, что отклик последней, всегда отстает от воздействия

[13,17]. Поэтому, в случае воздействия на балку внешней силы, при исследовании затухающих колебаний балки в моделируемой системе, когда одновременно совершаются одинаковые движения, сравниваемые спектры должны отличаться друг от друга только сдвигом.

Согласно [18,19], между существующими характеристиками, описывающими движение рассматриваемой деформируемой системы, существует взаимосвязь, которая позволяет определить величину сдвига фазы φ , тангенс которой $tg\varphi$ определяется по выражению

$$tg\varphi = \frac{x \cdot k}{V} \quad (26)$$

Однако, с учетом того, что жесткость податливой опоры может изменяться, сдвиг фазы во времени $tg\varphi$, предлагается определять как

$$tg\varphi = \frac{mg}{c} \cdot \frac{k}{V} \quad (27)$$

Для того, чтобы оценить влияние податливой опоры на величину деформаций изгиба пород кровли угольного пласта, при действии динамических нагрузок, были выполнены исследования на моделях

из эквивалентных материалов. Эксперименты были выполнены на специальном стенде, в лаборатории горного давления ДонНТУ, когда породы кровли угольного пласта были представлены в виде породной балки длиной $L_0=0,6$ м, толщиной $h=0,02$ м и шириной $B=0,04$ м. Масса балки соответствовала $m_0=1.4$ кг, модуль упругости $E=8800$ МПа, плотность $\rho=2100$ кг/м³. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [20-22] и нагружалась внешней силой P , (Н). С одной стороны балка имела жесткое закрепление в т. А, на расстоянии $AB= 2l$ балка опиралась на податливую опору из дробленой породы, имела различную насыпную плотность $\rho_{н.п.}$, (кг/м³) и пустотность M , (%), в зависимости от вариантов моделирования (рис.2). Гранулометрический состав дробленой породы, насыпная плотность и пустотность податливой опоры, были определены, в лабораторных условиях, в соответствии с [23].

Данные лабораторных исследований, по определению гранулометрического состава дробленой породы, насыпной плотности $\rho_{н.п.}$, (кг/м³) и пустотности M , (%) податливой опоры, по вариантам моделирования, представлены в табл.1. Масштаб моделирования соответствовал 1:100. Фото стенда, на котором проводились эксперименты, представлено на рис.2 а,б,в.

Таблица 1 - Гранулометрический состав дробленой породы, насыпная плотность и пустотность податливой опоры

Варианты моделирования	Размеры частиц, мм						Насыпная плотность $\rho_{н.п.}$, (кг/м ³)	Пустотность, M , %
	>4.0	4,0	3.0	2.0	1.0	<1.0		
№1		-	-	-	-	100%	1980	6
№2			50%	50%	-	-	1870	13
№3	-	100%	-	-	-	-	1670	20
№4	100%	-	-	-	-	-	1640	22

Количество измерений, которые необходимо выполнить, для получения надежных и достоверных результатов моделирования, определялось согласно рекомендаций [23,24] и соответствовало 10, а значит, при проведении экспериментов, было отработано по 10 моделей для каждого варианта.

При испытании моделей перемещения и деформации балки, регистрировались цифровой фотокамерой типа Canon. По фотографическим изображениям, с помощью пиксельных координат точек, с использованием основных принципов фотограмметрии [25], определялось положение моделируемой балки в пространстве, до и после действия на нее внешней силы.

Для определения величины прогиба балки X , (м), породный блок массой $m=0,2$ кг с высоты $H=0,3$ м

сбрасывали на балку в т. С. Рассматривали неупругий удар. Результаты экспериментов, по вариантам моделирования, представлены в табл.2.

На рис.3 приведены графики изменений величины прогиба балки X , (м) от жесткости податливой опоры C_n , (кН/м), с учетом ее насыпной плотности $\rho_{н.п.}$, (кг/м³) и пустотности M , (%).

Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением жесткости податливой опоры C_n , (кН/м), насыпная плотность $\rho_{н.п.}$, (кг/м³) увеличивается, а пустотности M , (%), наоборот, уменьшается (рис.4).

При падении породного блока массой $m= 0.2$ кг, с высоты $H=0.3$ м, прогиб балки X , (м) уменьшается, когда происходит увеличение жесткости податливой опоры C_n , (кН/м).

Таблица 2 - Экспериментальные значения величины прогиба балки X , (м) и жесткости податливой опоры C_p , (кН/м)

Показатели	Варианты моделирования			
	1	2	3	4
Величина прогиба X , (м)	0.0009	0.0026	0.0054	0.007
Жесткость податливой опоры C_p , (кН/м)	17.0	6.0	2.9	2.2

Установлено, что максимальный прогиб баки, равный $X=0.007$ м отмечен при минимальной жесткости податливой опоры $C=2.2$ кН/м, при ее пустотности $M=22\%$ (рис.3). В этом случае, после силового воздействия падающей породы, балка разрушилась (рис.2а). Минимальный прогиб балки, равный $X=0.0009$ м, зафиксирован в случае, когда жесткость податливой опоры равна $C_p=17,0$ кН/м (рис.3). Пустотность опоры, в этом варианте моделирования, составляла $M=6\%$. При падении породного блока известной массы, балка разрушилась (рис.2б).

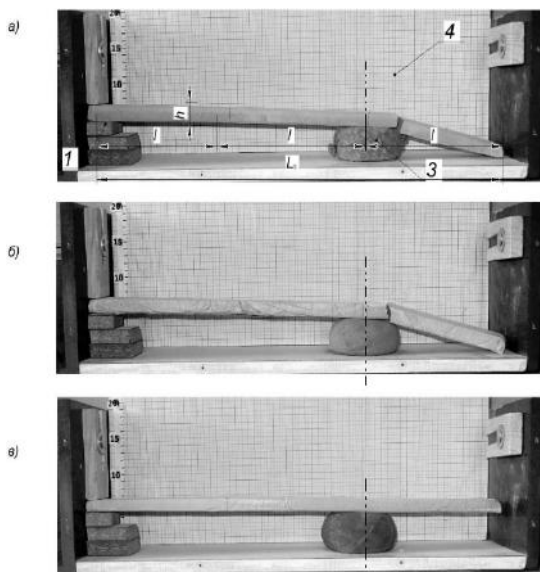


Рис.2 – Фото стенда для изучения устойчивости пород кровли угольного пласта с податливой опорой различной жесткости C_p , (кН/м), при действии динамических нагрузок: 1- жесткая опора; 2- балка-непосредственная кровля; 3- податливая опора из дробленой породы; 4- стенд с координатной сеткой: L_b - длина балки, (м); h -толщина балки, (м); $L_0=0.6$ м; $l=0.2$ м; а) насыпная плотность податливой опоры $\rho_{н.п.}=1640$ кг/м³; б) насыпная плотность податливой опоры $\rho_{н.п.}=1980$ кг/м³; в) насыпная плотность податливой опоры $\rho_{н.п.}=1870$ кг/м³

Следует отметить, что в случае, когда пустотность податливой опоры равна $M=13\%$,

смещения балки составили $X=0.0026$ м, при жесткости податливой опоры $C=6.0$ кН/м (рис.4). В таких условиях, при действии динамических нагрузок на балку, обеспечивается устойчивость моделируемой системы и целостность балки (рис.3,в).

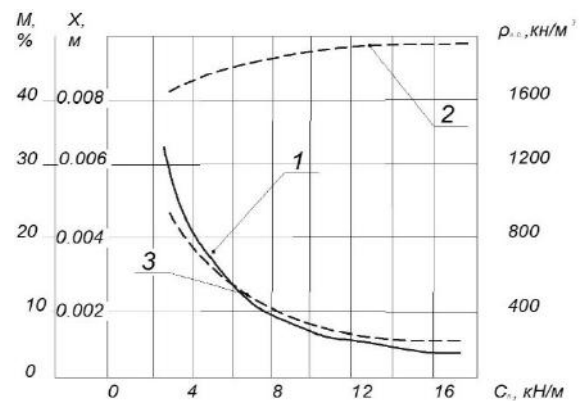


Рис.3 – Графики изменений величины прогиба балки X , (м) от жесткости податливой опоры C_p , (кН/м), с учетом насыпной плотности $\rho_{н.п.}$ (кг/м³) и пустотности M , (%): 1- X , (м); 2- $\rho_{н.п.}$ (кг/м³); 3- M , (%)

Экспериментально обосновано, что разрушение балки в моделируемой системе, а, следовательно, обрушение пород кровли, при действии динамических нагрузок, происходит в условиях, когда пустотность податливой опоры, предназначенной для поддержания пород кровли угольного пласта позади очистного забоя, находится в интервале $M>20\%$ или $M\leq 6\%$, при увеличении ее насыпной плотности.

На рис.4 представлены графики изменений величины максимального сжатия податливой опоры ΔX , (м), после падения породного блока на балку и возможного отклонения балки от положения равновесия a , (м), от изменения жесткости податливой опоры C_p , (кН/м).

Из полученных зависимостей видно, что с учетом изменения жесткости податливой опоры, величина ее максимального сжатия ΔX , (м) изменяется и, при $C_p=17.4$ кН/м принимает минимальное значение, равное $\Delta X=0.003$ м. Затем, по мере уменьшения жесткости опоры до величины равной $C_p=3.0$ кН/м, значение ΔX , (м) увеличивается до $\Delta X=0.0076$ м, т.е.

2.5 раза (рис.4). При этом, величина возможного отклонения балки от положения равновесия a , (м), уменьшается в 2,2 раза, соответственно, с $a=0.003$ м до $a=0.0069$ м. (рис.4).

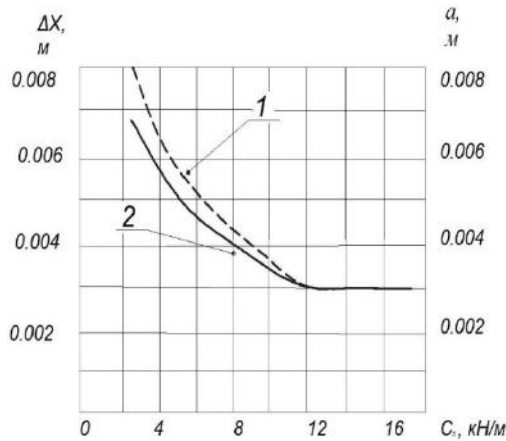


Рис. 4 – Графики изменений величины максимального сжатия податливой опоры ΔX , (м), на которую опирается балка и возможного отклонения балки от положения равновесия a , (м) от изменения жесткости податливой опоры C_n , (кН/м): 1- ΔX , (м); 2- a , (м)

Экспериментально установлено, то при жесткости податливой опоры $C_n \geq 10.2$ кН/м, когда величина ее максимального сжатия ΔX , (м), равна величине возможного отклонения балки от положения равновесия a , (м), т.е. когда $a \approx \Delta X$, (м), при действии динамической нагрузки на балку, происходит ее разрушение (рис.2.б). В случае, когда $C_n < 10.2$ кН/м и $a < \Delta X$, (м), моделируемая система находится в устойчивом состоянии, целостность балки сохраняется (рис.2 в).

На рис. 5 представлены графики изменений продолжительности удара $t_{уд}$, (с) и промежутка времени Δt , (с) от жесткости C_n , (кН/м) податливой опоры.

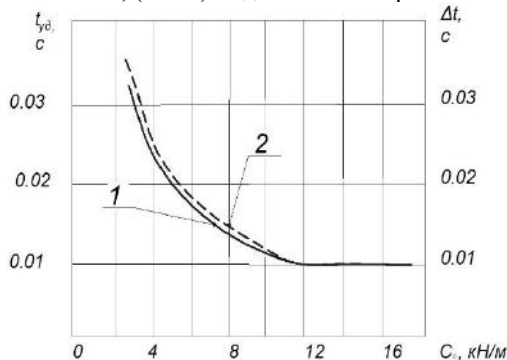


Рис. 5 – Графики изменений продолжительности удара $t_{уд}$, (с) и промежутка времени Δt , (с) от жесткости податливой опоры C_n , (кН/м): 1- $t_{уд}$, (с); 2- Δt , (с)

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением жесткости податливой опоры C , (кН/м), продолжительность удара $t_{уд}$, (с) и промежуток времени Δt , (с), уменьшаются (рис.5). Установлено, что при жесткости податливой опоры $C=2.9$ кН/м, продолжительность удара равна $t_{уд}=0.032$ с, а $\Delta t=0.035$ с. Разница между этими величинами составляет 0.003 с (рис.5). При жесткости податливой опоры $C=6.0$ кН/м, когда $t_{уд}=0.017$ с, а $\Delta t=0.018$ с, разница составляет 0.001 с (рис.6). В этих случаях при действии динамической нагрузки на балку, ее целостность сохраняется. В случае, когда $C=17.0$ кН/м, при продолжительности удара $t_{уд}=0.001$ с и $\Delta t=0.001$ с, (рис.5), т.е. когда $t_{уд}=\Delta t$, моделируемая система теряет свою устойчивость и балка разрушается.

На рис.6 представлен график изменения величины сдвига фазы во времени $tg\varphi$ от жесткости податливой опоры C_n , (кН/м).

Из полученной зависимости видно, что с увеличением жесткости податливой опоры C , (кН/м), величина сдвига фазы во времени $tg\varphi$, уменьшается. Причем, разница в определении $tg\varphi$ при минимальном значениями жесткости опоры $C=2.9$ кН/м и ее максимальным значением $C=17,0$ кН/м, составляет 70% (рис.6).

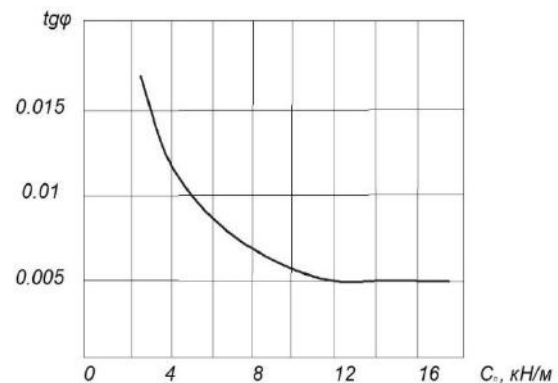


Рис. 6 – Графики изменений величины сдвига фазы $tg\varphi$ во времени от жесткости податливой опоры C_n , (кН/м)

На рис. 7, представлены графики, отражающие изменение величины ударной силы $P_{уд}$, (Н), при падении груза массой m , (кг) на балку, длиной L , (м), с жесткой или податливой опорой.

Установлено, что с увеличением высоты падения груза на балку, величина ударной силы $P_{уд}$, (Н) уменьшается в 2,8 раза, при наличии в рассматриваемой деформируемой системе податливой опоры, в сравнении с вариантом, в котором моделируемая балка имеет жесткие опорные связи (рис. 7).

Таким образом, в результате выполненного комплекса исследований определения условий устойчивости боковых пород, с использованием податливых охранных сооружений- опор, расположенных позади очистного забоя, отмечено, что при действии динамических нагрузок на кровлю

угольного пласта, действующая критическая нагрузка, подобна разрушающей, при расчете балки на изгиб. Обоснованно, что условиями устойчивости кровли, являются геометрические параметры, отражающие перемещение балки и величину мгновенного сжатия податливой опоры при ударе.

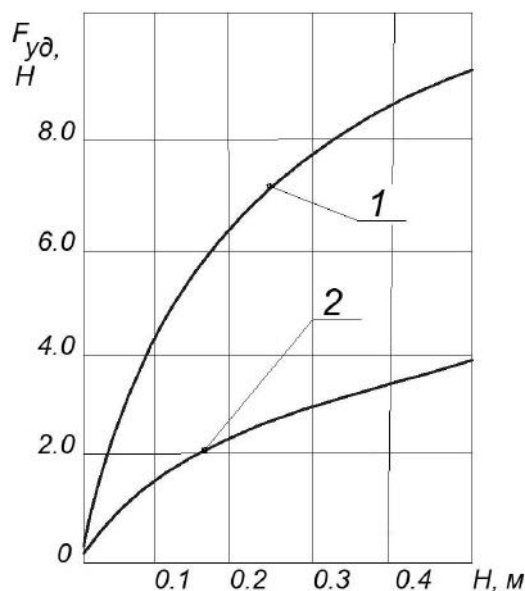


Рис. 7 – Графики изменений величины ударной силы $F_{уд}$ (Н), при падении груза массой m , (кг) на балку длиной L , (м), имеющей различные опорные связи, от высоты падения H , (м): 1- с жесткими опорными связями; 2- с податливой опорой; $m = 0.2$ кг; $L_0 = 0.6$ м

Доказано, что из-за неоднородности материала балки и податливой опоры, которая имеет различную гранулометрический состав, а следовательно пустотность и насыпную плотность, с учетом величины внешней силы, деформация балки будет отставать от ее перемещения во времени, на величину сдвига фазы, которая зависит от физико-механических свойств балки, ее массы и жесткости податливой опоры. Исходя из этого, деформация балки, вызванная соответствующими перемещениями, достигает своего наибольшего значения не одновременно с окончанием действия внешней силы на балку, а через некоторую величину $t_{гф}$.

Экспериментально установлено, что устойчивость моделируемой системы, в которой породы кровли угольного пласта считаются балкой, что опирается на податливую опору, зависит от величины сжатия податливой опоры ΔX , (м) и возможного отклонения центра масс a , (м) этой балки от положения равновесия при ударе. Определено, что закон движения балки, после силового воздействия падающей породы, зависит от времени, когда перемещения балки достигают максимальных значений, что определяет напряженно-деформированное состояние системы и ее устойчивость.

Вывод

Устойчивость боковых пород в окрестности поддерживаемых горных выработок, в т.ч. при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи, обеспечивается за счет размещения позади очистного забоя податливых охранных сооружений-опор из дробленой породы, обоснованного гранулометрического состава, что так же позволит повысить эффективность мероприятий по безопасности труда горнорабочих в глубоких угольных шахтах.

Список литературы

1. **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.
2. **Жуков, В. Е.** Малоотходная технология добычи угля / **В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и др.** – К.: Техника, 1984. – 144 с.
3. **Liashok, Ya.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development / **Ya. Liashok, I. Jordanov, D. Chepiga, S. Podkopaiev** // *Mining of Mineral Deposits.* – 2018. – Vol.12, 4. – P. 9-19. - doi: 10.1547//mining12.04.009.
4. **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.
5. **Шашенко, А. Н.** Геомеханика / **А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова.** - К: Новый друк, 2016. - 528 с.
6. **Шакирзянов, Р. А.** Динамика и устойчивость сооружений / **Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов.** – Казань: Изд-во Казанс. гос. архит-стр. ун-та, 2005. - 120с.
7. **Циглер, Ф.** Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер.** - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика». - 2002. – 912 с.
8. **Varuh, H.** Applied Dynamics / **H. Varuh.** – Taylor Francis Group. LLS, 2015. – 872 p.
9. **Акимов, В. А.** Теоретическая механика. Динамика. В 2ч. Ч2. Динамика материальной точки / **В. А. Акимов и др.** / 368-3. Под общ. ред. проф. **А. В. Чигарева** – Минск: Новое зна-ние, 2010. – 863 с.
10. **Кильчевский, Н. А.** Теория соударений твердых тел / **Н. А. Кильчевский.** - Киев: Наукова думка, 1969. – 246 с.
11. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics / **I. Ginsberg.** – Cambridge University Press, 2008. – 726 p. – doi: 10.1017/CBO9780511805899.
12. **Kleppner, D.** An introduction to Mechanics / **D. Kleppner, R. Kolenkow.** – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
13. **Стрелков, С. П.** Введение в теорию колебаний / **С. П. Стрелков.** - СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
14. **Гусев, А. Ф.** Прикладная теория колебаний / **А. Ф. Гусев, М. В. Навоселова.** - Тверской госуд. ун-т, 2017. – 160 с.
15. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analisic Reserch. - In Tech. / **F.Ebrahimi.** – 2011. – 456 p. – doi: 10.5772/639.
16. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations / **W. J. Bottega.** – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.

17. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic / **N. Baddour**. – In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
18. **Ковалева, Н. В.** Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции / **Н. В. Ковалева, Ю. Л. Рутман, Г. В. Давыдова** // *Инженерно-строительный Журнал. Magazine of Civil Engineering*, №5. – 2013. – С. 107-115.
19. **Водопьянов, В. И.** Исследование демпфирующих свойств материалов / **В. И. Водопьянов, А. А. Белов**. - Волгоград, ВолгГТУ, 2001. – 12 с.
20. Національний стандарт України. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT) ДСТУ EN196-1:2007. Київ, Мінбуд України, 2007. – 30с.
21. **Борщ-Компониц, В. И.** Практическая механика горных пород / **В. И. Борщ-Компониц**. - М.: Из-во «Горная Книга», 2013. - 322с.
22. **Дворкин, Л. И.** Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / **Л. И. Дворкин, В. И. Гоц, О. Л. Дворкин**. - М.: Инфра – Инженерия, 2015. - 418 с.
23. **Гавриш, М. М.** Механіка гірських порід / Під заг. С. С. **Греб'юнкін, М. М. Гавриша**. - Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 169 с.
24. **Бриджмен, П. В.** Анализ размерностей / **П. В. Бриджмен**. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
25. **Обиралов, А. И.** Фотограмметрия / **А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова**. - М.: Недра, 1969. - 392 с.
8. **Baruh, H.** Applied Dynamics, Taylor Francis Group, LLS, 2015, 872.
9. **Akimov, V.** Teoreticheskaya mekhanika, Dinamika, V 2ch, Chast' 2, Dinamika material'noy tochki [Theoretical mechanics, Dynamics, Part 2, Dynamics of the material point]. Ed. prof. **A. V. Chigareva**, Minsk: New knowledge, 2010, 863.
10. **Kilchevsky, N. A.** Teoriya soudareniy tverdykh tel [The theory of collisions of solids]. Kiev: Naukova Dumka, 1969, 246.
11. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726, doi: 10.1017/CBO9780511805899.
12. **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to Mechanics. Cambridge University Press, 2014, 542.
13. **Strelkov, S.** Vvedeniye v teoriyu kolebaniy [Introduction to the theory of oscillations]. SPb.: Publishing house "Lan", 2005, 440.
14. **Gusev, A., Navoselova, M.** Prikladnaya teoriya kolebaniy [Applied theory of oscillations]. Tver State, Univ, 2017, 160.
15. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analisic Reserch. In Tech, 2011, 456, doi: 10.5772/639.
16. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727.
17. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic. In Tech, Rijeka, Croatia, 2011, 236.
18. **Kovaleva, N., Rutman, Yu., Davydova, G.** Opredeleniye optimal'nykh parametrov dempfirovaniya v sistemakh seysmoizolyatsii [Determination of optimum damping parameters in seismic insulation systems]. *Construction Engineering Journal, Magazine of Civil Engineering*, 2013, 5, 107-115.

References (transliterated)

1. **Nikolin, V. I., Podkopaev, S. V., Agafonov, A. V., Maleev, N. V.** Snizhenie travmatizma ot pojavlenij gornogo davlenija [Injury Reduction of manifestations of rock pressure]. Donetsk: Nord-Press, 2005, 332.
2. **Zhukov, V., Vistorop, V., Kolchin, A. et al.** Malootkhodnaya tekhnologiya dobychi uglya [Low-waste coal mining technology]. K.: Technics, 1984, 144.
3. **Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, 12, 4, 9-19, doi: 10.1547//mining12.04.009.
4. **Zborshchik, M., Podkopaev, S.** Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovli v lavakh pri primenenii zakladki vyrabotannogo [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.
5. **Shashenko, A. N., Pustovoitenko, V. P., Sdvizhikova, E. A.** Geomekhanika [Geomechanics]. K: New druk, 2016, 528.
6. **Shakirzyanov, R., Shakirzyanov, F.** Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [Dynamics and stability of structures]. Kazan, Publishing House Kazans state arch-pp. University, 2005, 120.
7. **Ziegler, F.** Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey [Mechanics of solids and liquids]. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic mechanics", 2002, 912.
19. **Vodopyanov, V., Belov, A.** Issledovaniye dempfiroyushchikh svoystv materialov [Investigation of damping properties of materials], Volgograd, VolgGTU, 2001, 12.
20. Natsional'nyy standart Ukrayiny, Metody vyprobuvannya tsementu, Chastyna 1, Vyznachennya mitsnosti [National standard of Ukraine, Methods of test of cement, Part 1, Determination of durability] (EN 196-1: 2005, IDT) DSTU EN196-1: 2007, Kiev, Minsk Ukrini, 2007, 30.
21. **Borscht-Komponiyets, V.** Prakticheskaya mekhanika gornykh porod [Practical mechanics of rocks mountains]. M: From-in "Mountain Book", 2013, 322.
22. **Dvorkin, L., Gotz, V., Dvorkin, O.** Ispytaniya betonov i rastvorov, Proyektirovaniye ikh sostavov [Concrete and solution tests, Designing their compositions]. M.: Infra-Engineering, 2015, 418.
23. **Havrish, M.** Mekhanika hirs'kykh porod [Mechanics of rocks]. Pid zah. **S. Hreb'onkina, M. Havrish**. Donetsk: DonNTU, 2004, 169.
24. **Bridgman, P.** Analiz razmernostey [Dimension analysis], Izhevsk, Scientific and Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001, 148.
25. **Obiralov, A., Limonov, A., Gavrilova, N.** Fotogrammetriya [Photogrammetry]. M.: Nedra, 1969, 392.

Сведения об авторах (About the Authors)

Подкопаев Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; ORCID: 0000-0002-3258-9601; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

Serhii Podkopaiev – Doctor of Technical Sciences, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3258-9601; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

Иорданов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Igor Iordanov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9991-781X; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

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

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

Положий Антон Витальевич – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

Anton Polozhiy - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

Король Антон Вячеславович – инженер, ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, Украина; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Anton Korol – engineer, PSP "Dobropolskoe Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC ", Dobropolye, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Бойченко Геннадий Эдуардович – директор ООО «Шахта «Свято-Покровская №3», м. Покровськ, 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, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Подкопаев, С. В. Исследование на моделях устойчивости боковых пород при внезапных обрушениях расщелившейся толщи / **С. В. Подкопаев, И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Положий, А. В. Король, Г. Э. Бойченко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

Please cite this article as:

Podkopaiev, S., Iordanov, I., Simonova, Y., Polozhiy, A., Korol, A., Boichenko, H. Study on models of stability of side species at extreme damage of a divided thickness. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 48–57, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

Будь ласка, посилайте на цю статтю наступним чином:

Подкопаев, С. В. Дослідження на моделях стійкості бічних порід при раптових обваленнях розширеної товщі / **С. В. Подкопаєв, І. В. Іорданов, Ю. І. Сімонова, А. В. Положий, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 48-57. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.06.

АННОТАЦІЯ Метою роботи є визначення умов стійкості бічних порід в вуглепородному масиві, що вміщує виробки, при підтримці покрівлі вугільного пласта піддатливої опори. Для досягнення поставленої мети були виконані дослідження з залученням основних положень класичної механіки, теорії пружності і коливань, а також лабораторні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів, коли покрівля вугільного пласта була представлена у вигляді балки з піддатливою опорою. В результаті відпрацювання експериментальних моделей, враховувалися геометричні параметри, що відображають в певні моменти часу, величину можливого відхилення центру мас балки від положення рівноваги a , (м) при ударі і миттєвого стиснення піддатливої опори ΔX , (м). Доведено, що після силового впливу падаючої породи на балку, при певній жорсткості піддатливої опори, з урахуванням тривалості удару $t_{\text{уд}}$, (с) і проміжку часу, протягом якого переміщення балки досягає максимальних значень Δt , (с), тобто коли $t_{\text{уд}} = \Delta t$, (с) і $a \approx \Delta X$, (м), моделюєма система втрачає свою стійкість. При такій взаємодії балки з піддатливою опорою, у міру збільшення жорсткості охоронної споруди, коли a , (м) і ΔX , (м), приймають мінімальні значення, ймовірність руйнування бічних порід і їх обвалення в виробці, збільшується. Виконаний комплекс досліджень показує, що при раптових обваленнях розширеної породної товщі, для зниження рівня травматизму гірників і підвищення стійкості покрівлі вугільного пласта в робочій частині лави і позаду очисного вибою, доцільно застосування піддатливих опор з роздробленої породи, обґрунтованого гранулометричного складу.

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

Поступила (received) 23.08.2019

УДК 621.7.043

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ БЕЗ ПРИЖИМА ФЛАНЦА ЗАГОТОВКИ ИЗ ИЗОТРОПНОГО И АНИЗОТРОПНОГО МЕТАЛЛА

Р. Г. ПУЗЫРЬ

отделение машиностроения, Колледж Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, г. Кременчуг, УКРАИНА
e-mail: puzyruslan@gmail.com

АННОТАЦИЯ Рассматривается вопрос вытяжки цилиндрической детали без прижима фланца плоской заготовки в виде численного моделирования с помощью программного комплекса «Simulia Abaqus». При этом моделируется изотропный и анизотропный листовый металл с целью выявления особенностей их деформирования и правомерности допущений в аналитических моделях об изотропности материала. Показано, что распределение напряжений и деформаций для анизотропной и изотропной заготовки носит идентичный характер. Для проведения качественного анализа процессов вытяжки достаточно ограничиться изотропной моделью металла. Это значительно упростит получаемые аналитические выражения и время для интерпретации результатов. Для уточнения решений необходимо в математических моделях учитывать анизотропию листового металла, что даст возможность выявить зоны повышенной прочности и пластичности заготовки, а также количественно прогнозировать утонение в опасном сечении. Показано, что начальная анизотропия увеличивает коэффициент жесткости схемы напряженного состояния. Это приводит к ухудшению условий деформирования и исчерпанию ресурса пластичности раньше, чем для изотропной заготовки. В то же время возникновение гофров сопровождается перемещениями и поворотами материальных точек изначально плоской заготовки, однако для анизотропной заготовки эти смещения развиваются быстрее по ходу формообразования, но разрушение заготовки может наступить позже ввиду большей прочности заготовки по толщине в сравнении с прочностью в плоскости листа. Трехмерное моделирование позволило исследовать распределение нормальных напряжений, действующих по толщине заготовки. На радиусах закругления пуансона и дне заготовки действуют сжимающие напряжения, во фланце и стенках – растягивающие. Установлено, что увеличение прочности по толщине заготовки в виде увеличения модуля упругости первого рода позволило уменьшить деформацию анизотропной заготовки в опасном сечении. Для увеличения степени деформации при вытяжке за один переход необходимо выбирать металл с усиленными показателями прочности по толщине или проводить предварительную подготовку листового металла перед формообразованием. Это даст возможность уменьшить толщину заготовки без потери прочности конечного изделия и, тем самым, снизить металлоемкость сборочной единицы.

Ключевые слова: вытяжка; моделирование; пластическая деформация; изотропия; анизотропия; заготовка; напряжение

MODELING DRAWINGS OF A CYLINDER DETAIL WITHOUT CLIPPING A WORKING FLANGE FROM AN ISOTROPIC AND ANISOTROPIC METAL

R. PUZYR

Department of Mechanical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University College, Kremenchuk, UKRAINE

ABSTRACT The issue of drawing a cylindrical part without pressing the flange of a flat workpiece in the form of numerical simulation using the software package "Simulia Abaqus" is considered. In this case, isotropic and anisotropic sheet metal is modeled in order to identify the features of their deformation and the validity of assumptions in the analytical models of the isotropy of the material. It is shown that the distribution of stresses and strains for anisotropic and isotropic billets is identical. To conduct a qualitative analysis of the drawing processes, it is sufficient to limit itself to an isotropic metal model. This will greatly simplify the resulting analytical expressions and the time for interpreting the results. To clarify the solutions, it is necessary in mathematical models to take into account the anisotropy of the sheet stock, which will make it possible to identify areas of increased strength and ductility of the workpiece, as well as quantitatively predict thinning in a dangerous section. It is shown that the initial anisotropy increases the stiffness coefficient of the stress state scheme. This leads to a worsening of the deformation conditions and the exhaustion of the ductility resource earlier than for an isotropic billet. At the same time, the appearance of corrugations is accompanied by displacements and rotations of material points of the initially flat billet, however, for anisotropic billet, these displacements develop faster along the course of forming, but destruction of the billet may occur later due to the greater strength of the billet in thickness in comparison with the strength in the sheet plane. Three-dimensional modeling allowed us to study the distribution of normal stresses acting across the thickness of the workpiece. At the radii of curvature of the punch and the bottom of the workpiece, compressive stresses act, in the flange and walls - tensile stresses. It was established that an increase in the strength over the thickness of the workpiece in the form of an increase in the elastic modulus of the first kind made it possible to reduce the deformation of the anisotropic workpiece in a dangerous section. To increase the degree of deformation during drawing in one transition, it is necessary to choose a metal with enhanced strength indicators for thickness or to carry out preliminary preparation of sheet metal before shaping. This will make it possible to reduce the thickness of the workpiece without losing the strength of the final product and, thereby, reduce the metal consumption of the assembly unit.

Keywords: drawing; modeling; plastic deformation; isotropy; anisotropy; workpiece; stresses

Введение

Первый переход вытяжки цилиндрических деталей разделяется по способу приложения давлений

на фланец заготовки – стационарный прижим, дифференцированный прижим, без прижима фланца, а также с поэтапным давлением и разглаживанием гофров. В классическом подходе применяется

матрица, пуансон и прижимное кольцо, которое предотвращает складкообразование [1-3]. Степень деформации здесь ограничивается научно обоснованными рекомендациями, которые опираются на многолетний практический опыт и теоретические наработки отечественных и зарубежных исследователей [4-7]. Для ее увеличения как раз и задействуют выше приведенные приемы, которые направлены на создание дополнительных силовых или кинематических воздействий на фланец заготовки [8-10]. Однако, разработка и применение новых конструктивных схем вытяжки цилиндрических деталей должны проводиться с учетом механических характеристик штампуемого металла для достижения наилучшего результата. Особенно это необходимо учитывать при моделировании процессов обработки металлов давлением с помощью конечно-элементных прикладных комплексов.

Цель работы

Провести сравнение поля напряжений и деформаций при вытяжке начально изотропного и анизотропного металла, а также сформировать рекомендации для их использования в процессах листовой штамповки.

Изложение основного материала

В листовой штамповке используют изначально анизотропный металл, полученный горячей или холодной с последующей дрессировкой прокаткой. Так, например, в автомобилестроении доля стального холоднокатанного листа составляет до 50% массы автомобиля, где из него изготовлены детали методами холодной листовой штамповки [11].

Как показывают исследования [12-15], плоская анизотропия в целом негативно сказывается на процессе холодной вытяжки. В сравнении с изотропной заготовкой для того, чтобы предотвратить возникновение гофров при вытяжке без прижима, нужно увеличивать толщину анизотропной заготовки в 1,6 – 2 раза. Теоретический учет анизотропии достаточно сложен поэтому прибегают к упрощенным моделям анизотропной среды: ортотропный материал [16], где различие механических свойств описывается в трех перпендикулярных направлениях (задача усложняется тем, что при пластической деформации такого материала, например, в условиях плоского напряженного состояния, главные оси приращений деформаций и главные оси напряжений совпадают только при определенных положениях главных осей напряжений относительно главных осей анизотропии, которые характеризуются определенными углами [17]); трансверсальная изотропия [18]; полная изотропия [19]. Аналитические выражения для определения поля напряжений с учетом любых моделей анизотропной среды получается достаточно сложными и поэтому их применение и анализ вызывает определенные трудности [12,13].

Особый интерес вызывают прикладные конечно-элементные комплексы, с помощью которых

представляется возможным смоделировать процессы листовой штамповки, провести анализ распределения напряжений и деформаций, определить факторы процесса, оказывающие влияние на формообразование [20,21].

Для моделирования вытяжки цилиндрической заготовки применяли прикладной комплекс Simulia Abaqus – student edition, который предоставляется инженеринговой компанией «ТЕСИС» в качестве ознакомительного и отличается от профессиональных версий ограниченным количеством узлов конечно-элементной модели. Моделировали вытяжку без прижима фланца заготовки с геометрическими характеристиками: входной диаметр матрицы – 50 мм; диаметр пуансона – 46 мм; односторонний зазор между матрицей и пуансоном – 2 мм (рекомендации [1]); радиус входной кромки матрицы – 12 мм; радиус закругления пуансона – 6,5 мм; диаметр заготовки – 100 мм; толщина заготовки – 1,4 мм.

В качестве металла заготовки моделировалась сталь 08 кп со следующими механическими характеристиками: модуль упругости – 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3; предел прочности – 320 МПа; предел текучести – 230 МПа [22]. Диаграмму истинных напряжений аппроксимировали зависимостью $\sigma_{0,2} = 230 + 3,46\varepsilon^{0,6}$. Задачу решали со следующими допущениями: металл заготовки изначально ортотропен, приобретенная в процессе пластической деформации анизотропия листового металла мала и не оказывает существенного влияния на его начальную анизотропию; материал заготовки несжимаем; упрочнение металла изотропно; эффект Баушингера отсутствует. Для изотропного материала принимали, что металл заготовки изначально изотропен.

Пуансон и матрица задавались как недеформируемые твердые 3D тела, полученные экструзией, заготовка – как деформируемое твердое тело в 3D постановке. Вообще вытяжка, является осесимметричной задачей, однако в при такой постановке не учитывается гофрообразование, поэтому задачу решали трехмерным моделированием. Ортотропию листового металла задавали инженерными константами – $E_1=168$ ГПа; $E_2=196$ ГПа; $E_3=270$ ГПа – модули Юнга в плоскостях ортотропии; $\mu_1=\mu_2=\mu_3=0,28$ – коэффициенты Пуассона; $G_1=G_2=G_3=78$ ГПа – модули сдвига.

Во вкладке «сборка» устанавливали заготовку соосно с матрицей и пуансоном, при этом рассматривали $\frac{1}{2}$ часть заготовки, так как задача осесимметричная (рис. 1). При генерировании сетки конечных элементов для инструмента определяли свободный способ ее построения и выбирали тип элементов R3D4, задав билинейный порядок элемента, который содержится в стандартной библиотеке из разряда твердотельных четырехугольных. Для заготовки – гексаэдрическую форму элемента и способ ее построения разверткой, тип элемента C3D8R с линейным порядком элемента со стандартной библиотеки из разряда 3D Stress, то есть работающего во

всех трех направлениях по всему объему. Сборка с конечно-элементной сеткой представлена на рис. 1.

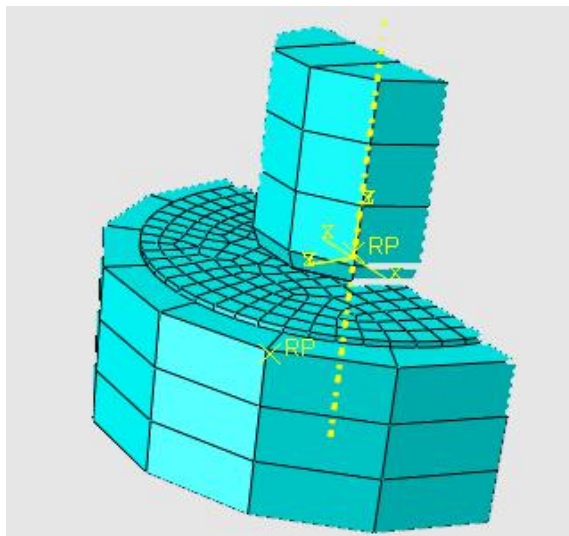


Рис. 1 – Сетка конечных элементов на модели для безприжимной вытяжки

Далее задали тип взаимодействия как контактный между заготовкой и штамповой оснасткой, а в качестве механических ограничений в соответствующем модуле программы определили кинематический контактный метод с конечной формулировкой скольжения. В свойствах контакта применили нормальное и касательное взаимодействие с коэффициентом трения 0,15 [1]. Матрицу закрепили по всем степеням свободы, а для имитации силового воздействия на заготовку сообщили вертикальное перемещение пуансону со скоростью 3 мм/с. Длительность расчета ограничились 50 сек., тем самым глубина его внедрения составила 14,9 мм. Т.е. заготовка обогнула вытяжную кромку матрицы и остановилась на калибрующем пояске. Достаточность такого перемещения обуславливается ранее проведенными экспериментальными исследованиями по вытяжке цилиндрических полуфабрикатов без прижима фланца, откуда выявлено формирование гофров, а также разрушение в виде отрыва дна на некоторых заготовках из алюминиевых сплавов [15,23].

Обсуждение результатов

Рекомендованным интервалом вытяжки без прижима фланца является заготовка толщиной 18-22s, где s – толщина листа [1,2,24]. Поэтому в работе намерено выходили за представленный интервал для анализа напряженно-деформированного состояния изотропной и анизотропной заготовок, условий формирования гофров и возникновения локализации деформаций. На рис. 2, 3 представлено распределение интенсивности напряжений по Мизесу, откуда можно заключить, что наибольшая интенсивность напряжений возникает в зонах изгиба мест образования гофров и для обоих случаев наблюдается примерно одинаковое распределение поля

напряжений. Для изотропной заготовки наибольшее значение интенсивности напряжений на 6% больше в указанных выше зонах.

На рис. 4 и 5 показано распределение компонент тензора напряжений для двух вариантов формоизменения. Здесь наблюдается одинаковая картина распределения напряжений по всему периметру полуфабриката. Во фланце действуют наибольшие по модулю сжимающие тангенциальные напряжения, а на радиусе закругления пуансона – растягивающие меридиональные. По толщине заготовки – по всей площади, кроме мест закругления пуансона, где присутствуют напряжения сжатия, действуют растягивающие нормальные напряжения. Это не противоречит современным представлениям об напряженном состоянии характерных зон профиля заготовки во время вытяжки [5,24–26].

Однако, как показывают результаты моделирования, экстремальные значения разнородных напряжений возрастают для анизотропной заготовки. Что позволяет заключить об увеличении коэффициента жесткости схемы напряженного состояния и возможном дальнейшем разрушении анизотропной заготовки. Так, например, для изотропной заготовки значение наибольших сжимающих тангенциальных напряжений, действующих во фланце, составляет 302 МПа, в то время как для анизотропной заготовки их значения равны 318 МПа, для растягивающих меридиональных – 290 МПа и 285 МПа соответственно. Также, интерес представляет распределение нормальных напряжений, действующих по толщине заготовки, которые не определяются в осесимметричной постановке задачи. Как видно из рис. 4, 5 величина сжимающих напряжений, действующих на радиусе закругления пуансона для анизотропной заготовки равна 192 МПа, для изотропной – 187 МПа. Это должно приводить к большей локализации деформаций в этой зоне для анизотропного материала. Однако, это не подтверждается распределением логарифмических деформаций, действующих по толщине заготовки, которые показаны на рис. 6.

В зоне радиусного закругления пуансона наблюдаются наибольшие сжимающие истинные деформации для обоих случаев. Но их величина больше для изотропного металла на 16%. Причем, если проследить перемещения материальных точек в направлении вертикальной оси, то можно заметить, что высота гофра для анизотропного случая больше на 0,1 мм, что должно приводить к чрезмерному утонению выше описанных зон и даже отрыву дна (рис. 7). Но этого не происходит, что свидетельствует об преимущественной деформации в плоскости листа, а не по толщине анизотропной заготовки, так как константы анизотропии в численной модели заданы более жесткими именно по толщине. Это подтверждает ранее установленный факт о благоприятных условиях вытяжки листовых заготовок, когда металл обладает большей прочностью в направлении толщины листа [11,27–30].

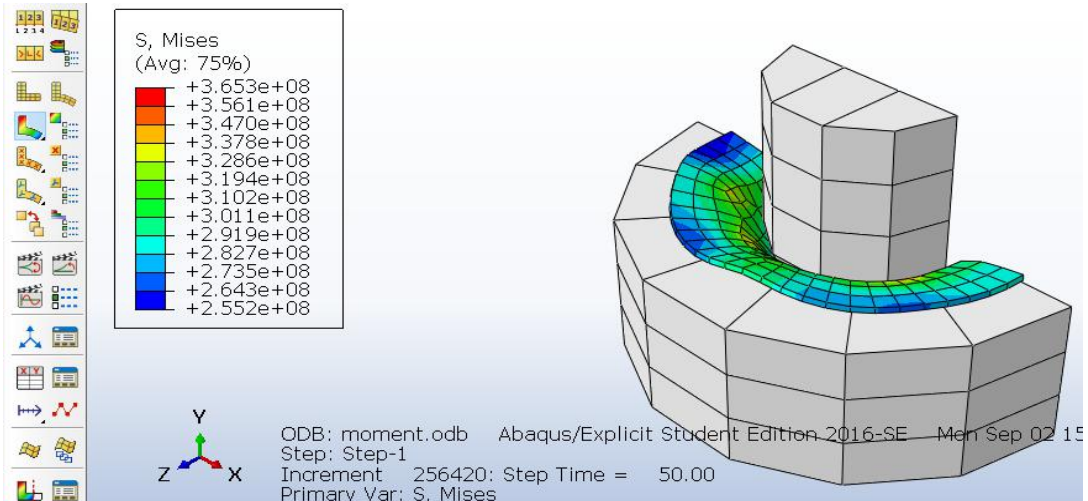


Рис. 2 – Інтенсивність напружень по Мизесу для ізотропного металла

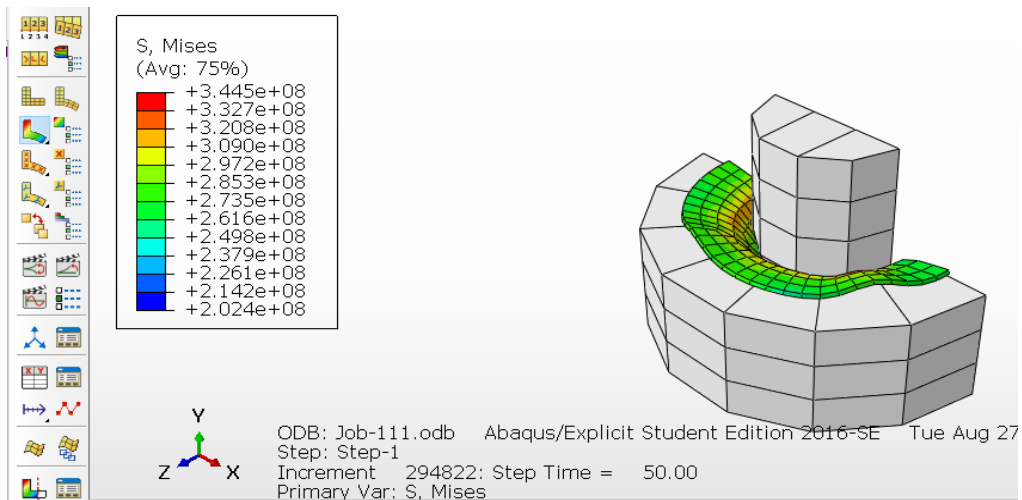


Рис. 3 – Розподілення інтенсивності напружень по Мизесу для анізотропної заготовки

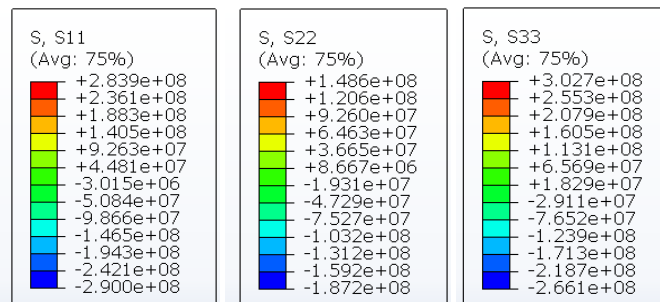


Рис. 4 – Розподілення компонент тензора напружень для ізотропної заготовки

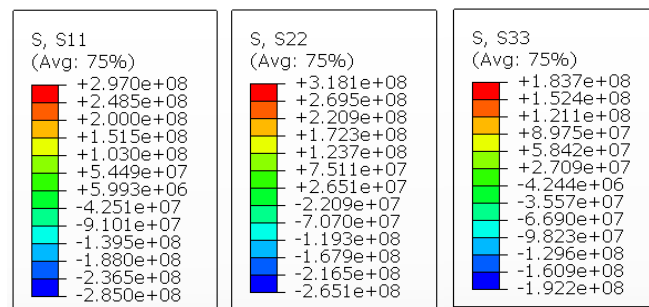


Рис. 5 – Розподілення компонент тензора напружень для анізотропної заготовки

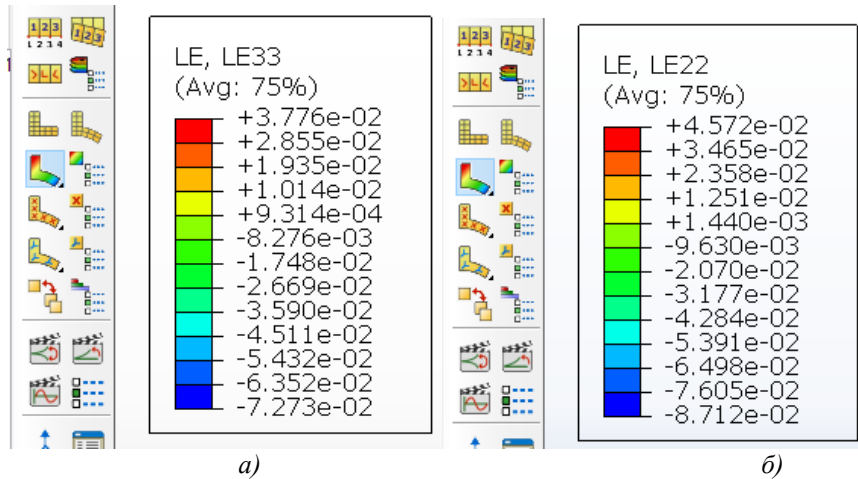
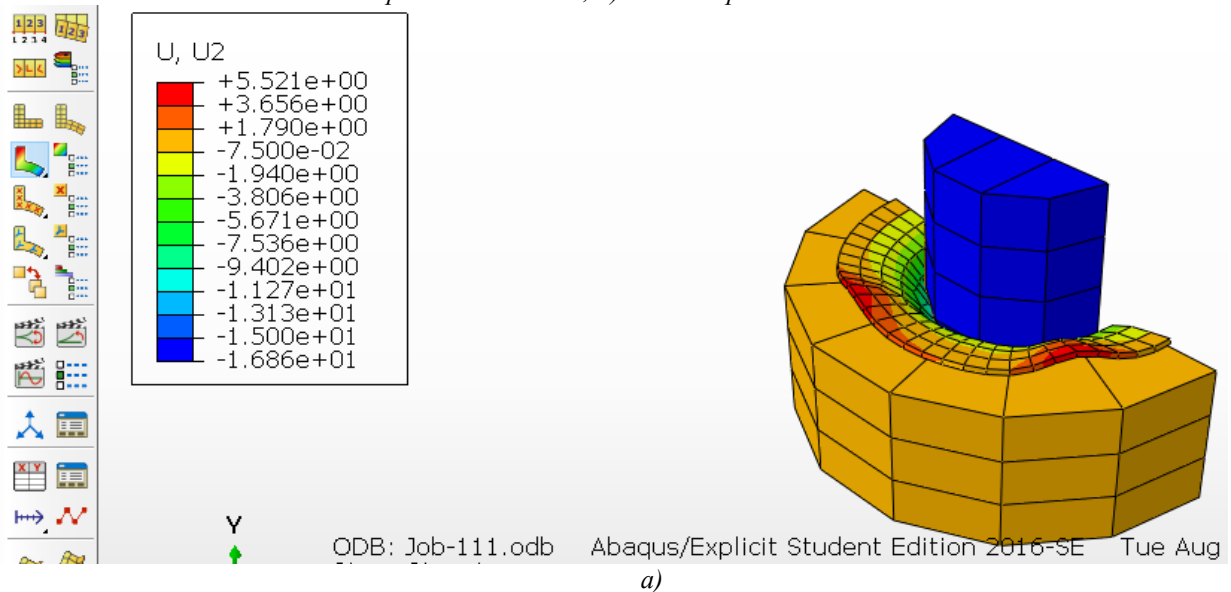
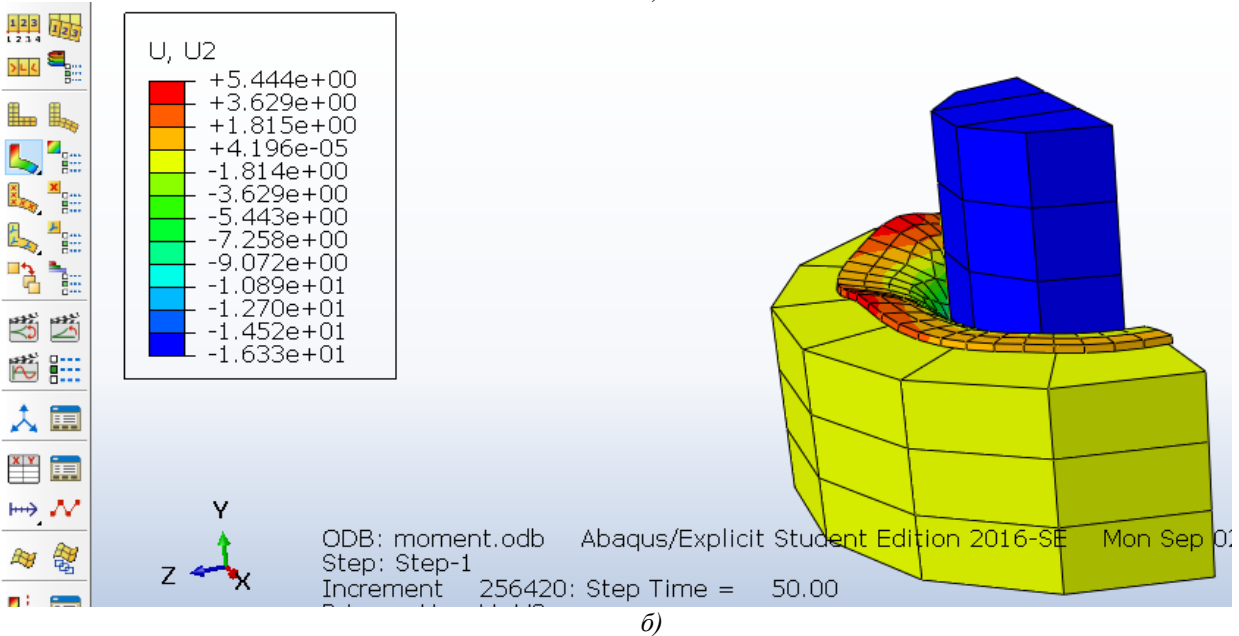


Рис. 6 - Распределение логарифмических деформаций, действующих по толщине заготовки: а) для анизотропного металла; б) для изотропного металла



а)



б)

Рис. 7 – Перемещение материальных точек заготовки в вертикальном направлении: а) анизотропный металл; б) изотропный металл

Выводы

Численное моделирование безприжимной вытяжки цилиндрического полуфабриката показало, что распределение напряжений и деформаций для анизотропной и изотропной заготовки носит идентичный характер. Для проведения качественного анализа процессов вытяжки достаточно ограничиться изотропной моделью металла. Что значительно упростит получаемые аналитические выражения и время для интерпретации результатов. Для уточнения решений необходимо в математических моделях учитывать анизотропию листовой заготовки, что даст возможность выявить зоны повышенной прочности и пластичности заготовки, а также количественно прогнозировать утонение в опасном сечении.

Показано, что начальная анизотропия увеличивает коэффициент жесткости схемы напряженного состояния. Это приводит к ухудшению условий деформирования и исчерпанию ресурса пластичности раньше, чем для изотропной заготовки. В тоже время возникновение гофров сопровождается перемещениями и поворотами материальных точек изначально плоской заготовки, однако для анизотропной заготовки эти смещения развиваются быстрее по ходу формообразования, но разрушение заготовки может наступить позже ввиду большей прочности заготовки по толщине в сравнении с прочностью в плоскости листа.

Трехмерное моделирование позволило исследовать распределение нормальных напряжений, действующих по толщине заготовки. На радиусах закругления пуансона и дне заготовки действуют сжимающие напряжения, во фланце и стенках – растягивающие. Установлено, что увеличение прочности по толщине заготовки на 60 ГПа (в виде увеличения модуля упругости первого рода) позволило уменьшить деформацию анизотропной заготовки в опасном сечении с 0,087 до 0,073, т.е. увеличение прочности на 19% позволило уменьшить деформацию сжатия на 16%. Для увеличения степени деформации при вытяжке за один переход необходимо выбирать металл с усиленными показателями прочности по толщине или проводить предварительную подготовку листового металла перед формообразованием. Это даст возможность уменьшить толщину заготовки без потери прочности конечного изделия и, тем самым, снизить металлоемкость сборочной единицы.

Список литературы

1. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
2. Шофман, Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л. А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
3. Калужний, В. Л. Інтенсифікація технологій виготовлення виробу «Балон 180×184» / В. Л. Калужний, А. С. Запороженко, В. В. Піманов // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 136–140.
4. Yang, C. Blank Shape Design for Sheet Metal Forming based on Geometrical Resemblance / C. Yang, P. Li, L. Fan // *Procedia Engineering.* – 2014. – 81. – P. 1487-1492. – doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.178.
5. Altınbalık, T. Numerical and experimental study of sheet thickness variation in deep drawing processes / T. Altınbalık, A. Tonka // *International Journal of Modern Manufacturing Technologies.* – 2012. – IV № 2. – P. 9 – 16.
6. Choi, M. K. Effect of Punch Speed on Amount of Springback in Ubending Process of Auto-body Steel Sheets / M. K. Choi, H. Huh // *Procedia Eng.* – 2014. – 81. – P. 963–968. – doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.125.
7. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
8. Калужний, О. В. Визначення максимального зусилля деформування та потовщення фланця при витягуванні з диференційованим радіальним підпором фланця / О. В. Калужний // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 38-44.
9. Wang, G. Numerical and experimental study of new cold precision forging technique of spear gears / G. Wang, G. Zhao, Sh. Xia, Y. Luan // *Trans. Nonferrous Metal Soc. China.* – 2003. – 13, №14. – P. 798-802.
10. Wang, X. Y. FEM analysis of drawing-thickening technology in stamping-forging hybrid process / X. Y. Wang, K. Ouyang, J. C. Xia // *Forging & Stamping Technology.* – 2009. – 34(4). – P. 73-78. – doi: 10.3969/j.issn.1000-3940.2009.04.017.
11. Матюк, В. Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор) / В. Ф. Матюк // *Не разрушающий контроль и диагностика.* – 2011. – № 1. – С. 3 – 31.
12. Жарков, В. А. Методика разработки технологических процессов вытяжки с учетом анизотропии листовых материалов / В. А. Жарков // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1991. – № 9. – С. 12–15.
13. Яковлев, С. С. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала // С. С. Яковлев, К. С. Ремнев // *Изв. вузов. Машиностроение.* – 2014. – № 9 (654). – С. 39–47.
14. Dasappa, P. The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams / P. Dasappa, K. Inal, R. Mishra // *Int J Solids Struct.* – 2012. – 49. – P. 3528–3550. – doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.04.021.
15. Аргат, Р. Г. Вплив анізотропії і зміцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузир, Р. А. Вакуленко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Серія: «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – №31 (1307). – С. 3–7.
16. Cardoso, R. P. R. A Generalisation of the Hill's quadratic yield function for planar plastic anisotropy to consider loading direction / R. P. R. Cardoso, O. V. Adetoro // *International Journal of Mechanical Sciences.* – 2017. – 128–129. – P. 253–268. – doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.04.024.

17. Головлев, В. Д. Расчеты процессов листовой штамповки / В. Д. Головлев. – М: Машиностроение, 1974. – 136 с.
18. Sosenushkin, E. N. Mechanics of nonmonotonic plastic deformation / E. N. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, A. E. Sosenushkin, V. V. Emel'yanov // *Russian Engineering Research*. – 2015. – Т. 35 (№12). – P. 902 -906. – doi: 10.3103/s1068798x15120199.
19. Аргат, Р. Г. Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы привытяжке цилиндрических заготовок / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих // *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*: сб. науч. тр. Темат. вып.: *Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии*. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 43 (1086). – С. 8-13.
20. Jurković, M. Mathematical modeling of the torque driving electric motor production line to the profiling forming thin sheets. Proceedings Int / M. Jurković, E. Mustafić // *Scientific Conference on Production Engineering*. – Budva. – 2013. – P. 47–52.
21. Harpell, E. Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet / E. Harpell, M. Worswickb, M. Finn, M. Jain, P. Martin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – 100. P. 131–141.
22. Мовшович, И. Я. Расчет меридиональных напряжений на первой операции процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес / И. Я. Мовшович, Р. Г. Пузырь // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2013. – № 10 – С. 3 – 7.
23. Savelov, D. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding / D. Savelov, V. Dragobetsky, R. Puzyr, A. Markevych // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Т. 2. – P. 67 – 75.
24. Pereira, M. P, Weiss M, Rolfe BF, Hilditch TB (2013) The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping / M. P. Pereira, M. Weiss, B. F. Rolfe, T. B. Hilditch // *Int J Mach Tools Manuf.* – 66. – P. 44–53. – doi: 10.1016/j.ijmactools.2012.11.001.
25. Laurent, H, Coër J, Manach PY, et al (2015) Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy / H. Laurent, J. Coër, P. Y. Manach // *Int J Mech Sci.* – 93. – P. 59–72. – doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.01.009.
26. Puzyr, R. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations / R. Puzyr, T. Naikova, J. Majernik, M. Karkova, J. Kmec // *Manufacturing Technology*. – 2018. – 18 (1). – P. 106–111. – doi:10.21062/ujep/61.2018/a/1213-2489/mt/18/1/106.
27. Yoon, J. W. A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity / J. W. Yoon, R. E. Dick, F. Barlat // *Int J Plast.* – 2011. – 27. – P. 1165–1184. – doi: 10.1016/j.ijplas.2011.01.002/.
28. Пузырь, Р. Г. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздате коническими пуансонами / Р. Г. Пузырь, О. В. Троцко, В. Ю. Черкашенко // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 114-121.
29. Chandrasekharan, S. Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test / S. Chandrasekharan, H. Palaniswamy, N. Jain // *Int J Mach Tools Manuf.* – 45. – P. 379–388. – doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.09.014.
30. Neto, D. M. Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation / D. M. Neto, M. C. Oliveira, L. Alves, L. F. Menezes // *Mater Des.* – 60. – P. 368–379. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.008.

References (transliterated)

1. Romanovsky, V. P. Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Cold stamping guide]. L.: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1979, 520.
2. Shofman, L. A. Teoriya i raschety protsessov kholodnoy shtampovki [Theory and calculations of processes of the cold stamping]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1964, 375.
3. Kalyughniyi, V. L., Zaporozchenko, A. P., Pimanov, V. V. Intensifikaciya tekhnologij vigotovlennya virobu «Balon 180×184» [Intensification of technologies of making of good is «Bulb 180×184»]. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov* [Treatment of materials pressure: collection of scientific labour]. Kramatorsk: DSMA, 2012, 2 (31), 136–140.
4. Yang, C., Li, P., Fan, L. Blank Shape Design for Sheet Metal Forming based on Geometrical Resemblance. *Procedia Engineering*, 2014, 81, 1487-1492, doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.178.
5. Altinbalik, T., Tonka, A. Numerical and experimental study of sheet thickness variation in deep drawing processes. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2012, 2, 9 – 16.
6. Choi, M. K., Huh, H. Effect of Punch Speed on Amount of Springback in Ubending Process of Auto-body Steel Sheets. *Procedia Eng*, 2014, 81, 963–968, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.125.
7. Popov, E. A. Osnovy teorii listovoj shtampovki [Fundamentals of the theory of sheet stamping]. M.: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1977, 278.
8. Kaljuzhniy, O. V. Vznachennja maksimal'nogo zusillja deformuvannja ta potovshhennja flancja pri vitjaguvanni z diferencijovanim radial'nim pidporom flancja [Determination of maximum force of deformation and thickening of the flange when drawing with differentiated radial support of the flange]. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov* [Treatment of materials pressure: collection of scientific labour]. Kramatorsk: DSMA, 2012, 1 (30), 38-44.
9. Wang G., Zhao, G., Xia, Sh., Luan, Y. Numerical and experimental study of new cold precision forging technique of spear gears. *Trans. Nonferrous Metal Soc. China*, 2003, 13, №14, 798-802.
10. Wang, X. Y., Ouyang, K., Xia, J. C. FEM analysis of drawing-thickening technology in stamping-forging hybrid process. *Forging & Stamping Technology*, 2009, 34(4), 73-78, doi: 10.3969/j.issn.1000-3940.2009.04.017.
11. Matjuk, V. F. Vlijanie tehnologii proizvodstva listovogo prokata nizkouglerodistyh kachestvennyh stalej na ih strukturnoe sostojanie i vzajmosvjaz' mezhdju mehanicheskimi i magnitnymi svojstvami (obzor) [The influence of the technology for the production of sheet metal of low-carbon high-quality steels on their structural state and the relationship between mechanical and magnetic properties (review)]. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], 2011, 1, 3 – 31.

12. **Zharkov, V. A.** Metodika razrabotki tekhnologicheskikh processov vytyazhki s uchetom anizotropii listovykh materialov [Technique of the development of technological processes of extraction, taking into account the anisotropy of sheet materials]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo [Forging production]*, 1991, **9**, 12–15.
13. **Yakovlev, S. S., Remnev, K. C.** Skladkoobrazovanie pri vytyazhke osesimmetrichnykh detalej iz anizotropnogo materiala [Wrinkling of axisymmetric parts made by drawing of an anisotropic material]. *Izv. vuzov. Mashinostroenie [Mechanical engineering]*, 2014, **9** (654), 39–47.
14. **Dasappa, P., Inal, K., Mishra, R.** The effects of anisotropic yield functions and their material parameters on prediction of forming limit diagrams. *Int J Solids Struct*, 2012, **49**, 3528–3550, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.04.021.
15. **Argat, R. G., Puzir, R. G., Vakulenko, R. A.** Vpliv anizotropii i zmienennja metalu na vtratu stijkosti flancija pri vitjaguvanni cilindrichnoi detali bez skladkoutrimuvacha [Influence of anisotropy and hardening of metal on loss of flange stability during elongation of cylindrical part without folding holder]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Serija: «Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii» [Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: "Innovative Technologies and Equipment for Materials Processing in Mechanical Engineering and Metallurgy"]*. Kharkov: NTU «HPI», 2018, **31** (1307), 3-7.
16. **Cardoso, R. P. R., Adetorob, O. B.** A Generalisation of the Hill's quadratic yield function for planar plastic anisotropy to consider loading direction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, **128–129**, 253–268, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.04.024.
17. **Golovlev, V. D.** Raschety processov listovoj shtampovki [Calculations of the processes of sheet punching (Stability of the formation of sheet metal)]. M.: *Mashinostroenie [Mechanical engineering]*, 1974, 136.
18. **Sosenushkin, E. N., Yanovskaya, E. A., Sosenushkin, A. E., Emel'yanov, V. V.** Mechanics of nonmonotonic plastic deformation. *Russian Engineering Research*, 2015, **35** (12), 902-906, doi: 10.3103/s1068798x15120199.
19. **Argat, R. G., Puzir, R. G., Dolgih, O. N.** Raspredelenie naprjazhenij na vytjazhnom rebre matricy pri vytjazhke cilindricheskikh zagotovok [Stress distribution on the exhaust edge of the matrix for tightening of cylindrical workpieces]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI». Serija: «Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii» [Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: "Innovative Technologies and Equipment for Materials Processing in Mechanical Engineering and Metallurgy"]*. Kharkov: NTU «HPI», 2014, **43** (1086), 8-13.
20. **Jurković, M., Mustafić, E.** Mathematical modeling of the torque driving electric motor production line to the profiling forming thin sheets. *Proceedings Int. Scientific Conference on Production Engineering*, 2013, 47–52.
21. **Harpell, E., Worswick, M., Finn, M., Jain, M., Martin, P.** Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **100**, 131–141.
22. **Movshovich, I. Ja., Puzyr, R. G.** Raschet meridional'nykh naprjazhenij na pervoj operacii processa radial'no-rotacionnogo profilirovanija obod'ev koles [Calculation of meridional stresses on the first operation of the process of radial-rotary profiling of wheel rims]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping production. Pressure treatment]*, 2013, **10**, 3 – 7.
23. **Savelov, D., Dragobetsky, V., Puzyr, R., Markevych, A.** Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, **2**, 67 – 75.
24. **Pereira, M. P., Weiss, M., Rolfe, B. F., Hilditch, T. B.** The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping. *Int J Mach Tools Manuf*, **66**, 44–53, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.11.001
25. **Laurent, H., Coër, J., Manach, P. Y.** Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy. *Int J Mech Sci*, **93**, 59–72, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2015.01.009.
26. **Puzyr, R., Haikova, T., Majernik, J., Karkova, M., Kmec, J.** Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations. *Manufacturing Technology*, 2018, **18** (1), 106–111, doi: 10.21062/ujep/61.2018/a/12132489/mt/18/1/106.
27. **Yoon, J. W., Dick, R. E., Barlat, F.** A new analytical theory for earing generated from anisotropic plasticity. *Int J Plast*, 2011, **27**, 1165–1184. doi: 10.1016/j.ijplas.2011.01.002.
28. **Puzyr, R. G., Trocko, O. V., Cherkashhenko, V. JU.** Vlijanie geometricheskikh parametrov cilindricheskoj zagotovki na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie pri razdache konicheskimi puansonami [The influence of the geometric parameters of the cylindrical workpiece on the stress-strain state during the distribution of conical punches]. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov [Treatment of materials pressure: collection of scientific labour]*. Kramatorsk: DSMA, 2012, **4** (33), 114-121.
29. **Chandrasekharan, S., Palaniswamy, H., Jain, N.** Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test. *Int J Mach Tools Manuf*, 2005, **45**, 379–388, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.014.
30. **Neto, D. M., Oliveira, M. C., Alves, J. L., Menezes, L. F.** Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation. *Mater Des*, 2014, **60**, 368–379, doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.008.

Сведения об авторах (About authors)

Пузырь Руслан Григорьевич – доктор технических наук, доцент, Колледж Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, преподаватель отделения машиностроения; г. Кременчуг, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Ruslan Puzyr – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University College, Kremenchuk, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пузырь, Р. Г. Моделирование вытяжки цилиндрической детали без прижима фланца заготовки из изотропного и анизотропного металла / **Р. Г. Пузырь** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 58-66. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.07.

Please cite this article as:

Puzyr, R. Modeling drawings of a cylinder detail without clipping a working flange from an isotropic and anisotropic metal. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **1**, 58–66, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.07.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Пузырь, Р. Г. Моделювання витягування циліндричної деталі без притиску фланця заготовки з ізотропного та анізотропного металу / **Р. Г. Пузырь** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 58-66. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.07.

АНОТАЦІЯ Розглядається питання витягування циліндричної деталі без притиску фланця плоскої заготовки у вигляді чисельного моделювання за допомогою програмного комплексу «Simulia Abaqus». При цьому моделюється ізотропний і анізотропний листовий метал з метою виявлення особливостей їх деформування і правомірності припущень в аналітичних моделях про ізотропність матеріалу. Показано, що розподіл напружень і деформацій для анізотропної та ізотропної заготовки носить ідентичний характер. Для проведення якісного аналізу процесів витягування досить обмежитись ізотропною моделлю металу. Це значно спростить одержувані аналітичні вирази і час для інтерпретації результатів. Для уточнення рішень необхідно в математичних моделях враховувати анізотропію листової заготовки, що дасть можливість виявити зони підвищеної міцності і пластичності заготовки, а також кількісно прогнозувати потоншення в небезпечному перерізі. Показано, що початкова анізотропія збільшує коефіцієнт жорсткості схеми напруженого стану. Це призводить до погіршення умов деформування і вичерпання ресурсу пластичності раніше, ніж для ізотропної заготовки. У той же час виникнення гофрів супроводжується переміщеннями і поворотами матеріальних точок спочатку плоскої заготовки, проте для анізотропної заготовки ці зсуви розвиваються швидше по ходу формоутворення, але руйнування заготовки може наступити пізніше через більшу міцність заготовки по товщині в порівнянні з міцністю в площині листа. Тривимірне моделювання дозволило дослідити розподіл нормальних напружень, що діють по товщині заготовки. На радіусах закруглення пуансона і дні заготовки діють стискаючі напруження, у фланці і стінках - розтягуючі. Встановлено, що збільшення міцності по товщині заготовки у вигляді збільшення модуля пружності першого роду дозволило зменшити деформацію анізотропної заготовки в небезпечному перерізі. Для збільшення ступеня деформації при витягуванні за один перехід необхідно вибирати метал з посиленими показниками міцності по товщині або проводити попередню підготовку листового металу перед формоутворенням. Це дасть можливість зменшити товщину заготовки без втрати міцності кінцевого виробу і, тим самим, знизити металоємність складальної одиниці.

Ключові слова: витягування; моделювання; пластична деформація; ізотропія; анізотропія; заготовка; напруження

Поступила (received) 30.08.2019

УДК 338.27/637.51

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08

ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ SOUS VIDE НА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ РІЗНИХ ВИДІВ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ

Д. В. ГАРМАШ^{1*}, В. М. ПАСІЧНИЙ²

¹ проблемна науково-дослідна лабораторія Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

² кафедра технологій м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: garmash93@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі розглянуто вплив обробки за технологією *Sous Vide* продуктів на основі м'яса птиці (філе курчат-бройлерів, четвертини курчат-бройлерів та м'яса качки) та яловичини на основні функціонально-технологічні характеристики готового продукту. Згідно плану дослідження було розроблено рецептури зразків, що відрізнялись видом використовуваної м'ясної сировини і також включали в себе соус Хойсін. Рецептури усіх зразків включали в себе 80% основної м'ясної сировини (філе курчат бройлерів, м'ясо качки, четвертину курчат-бройлерів та яловичину відповідно для зразків 1-4) та 20% соусу Хойсін. Обробку продуктів проводили однаковим методом, включаючи: приготування соусу, змішування основної сировини з соусом, обсмажування при 120 °C протягом 2 хв з кожного боку продукту, упакування у полімерні пакети зі створенням розрідження на вакуум-апараті, варіння упакованих зразків протягом 1 год при 60 °C, охолодження шокним методом та зберігання протягом 14 днів. Серед досліджуваних показників обрано вміст вологи, вологозв'язувальну (ВЗЗ) та вологоутримуючу (ВУЗ) здатності, вміст водо- та солерозчинних білків. Усі показники вимірювали після 7 та 14 днів зберігання по 3 рази кожен. значення прийнято середніми. Значення вмісту вологи було характерним для використовуваної сировини та досягало максимального значення для зразка 3 після 7 днів зберігання – 74,4 %, а мінімуму – для зразка 2 після 14 днів зберігання - 62,4%. Вологозв'язувальна здатність усіх зразків знаходиться у залежності з консистенцією продукту. Таким чином вона має найнижчі значення серед дослідних зразків для зразка 1, оскільки він включає в свою рецептуру філе курчат бройлерів, яке є більш чутливим до термічної обробки і осмотичних процесів, ніж сировина, що використовувалась у інших зразках. Максимальне значення ВЗЗ зафіксовано у зразку 4 – 78,9 та 77,2 % відповідно через 7 і 14 днів зберігання. З розглянутих джерел та проведеної роботи можна зробити висновки про те, що обробка за технологією *Sous Vid* позитивно впливає на усі досліджувані види основної сировини, включаючи м'ясо качки, та може успішно комбінуватись з попередньою кулінарною обробкою.

Ключові слова: технологія *Sous Vide*; вакуум; м'ясо птиці; м'ясо качки; функціонально-технологічні властивості; термін зберігання

THE IMPACT OF SOUS VIDE TECHNOLOGY APPLICATION ON THE FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PRODUCTS BASED ON DIFFERENT TYPES OF MEAT RAW MATERIALS

D. GARMASH¹, V. PASICHNYI²

¹ Problematic scientific-research laboratory of NUFT, Kyiv, UKRAINE

² Department of meat and meat products technology of NUFT, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT There is considered the influence of *Sous Vide* processing on the poultry meat based products (broiler chicken fillet, quarters of broiler chicken and duck meat) and beef-based products on functional and technological characteristics of the finished product. According to the research plan, recipe samples were developed that differed in the type of used raw meat materials and also included Hoisin sauce. The recipes of all samples included 80% of the main meat raw material (broiler chicken fillet, duck meat, quarters of broiler chickens and beef, respectively, for samples 1-4) and 20% of Hoisin sauce. The processing of products was carried out in the same way, including: sauces, mixing the main raw materials with sauce, frying at 120° C for 2 minutes on each side of the product, packing in polymer bags with the formation of vacuum on the vacuum apparatus, cooking of packed samples for 1 hour at 60 °C, cooling shock method and storage for 14 days. Among the examined parameters are selected: the content of moisture, water holding (WHC) and water retaining (WRC) capacity, the content of water-soluble and salt-soluble proteins are selected. All measurements were examined after 7 and 14 days of storage 3 times each - values was taken as average. The moisture content was characteristic of the raw material used and reached the maximum value for sample 3 after 7 days of storage – 74.4%, and the minimum for sample 2 after 14 days storage – 62.4%. The moisture content of all samples depends on the consistency of the product. Thus, it has the lowest values among the experimental samples for sample 1, since it includes in its recipe a fillet of broiler chickens, which is more sensitive to heat treatment and osmotic processes than the raw material used in other specimens. The maximum value of the ultrasound was recorded in the sample of 4 – 78.9 and 77.2%, respectively, in 7 and 14 days storage. From the sources and the work carried out, it can be concluded that *Sous Vid* treatment positively affects all investigated types of the main raw material, including duck meat, and can be successfully combined with the previous culinary treatment.

Keywords: *Sous Vide* technology; vacuum; poultry meat; duck meat; functional and technological properties; shelf life

Вступ

Застосування технології *Sous Vide* в сучасних умовах набуває дедалі більшого поширення в Україні,

як у промисловості, так і у сфері закладів харчування. Суть даної технології полягає в упакуванні продуктів у непроникні (полімерні) плівки або пакети з подальшим видаленням кисню з середовища

навколо продукту. Перевагами даної технології є зменшення втрат вологи продукту у процесі термообробки, а також зменшення температури проведення термообробки шляхом створення розрідження у середовищі під плівкою. Розрідження, близьке до вакууму, що створюється внаслідок видалення повітря з простору під упаковкою, дозволяє знизити температуру кипіння вологи у продукті, в той же час унеможливаючи втрати вологи у навколишнє середовище [1]. Внаслідок цього можливо виділити декілька позитивних наслідків застосування технології *Sous Vide* у технології м'ясопродуктів. - збереження органолептичних властивостей продукту внаслідок зменшення втрат смакоароматичних та екстрактивних речовин [2].

- високий вміст усіх форм вологи у готовому продукті, що обумовлене не тільки фізичному перешкоджанню втрат вологи через упаковку, але й зменшенням рівня руйнування клітин, таким чином і більше утримування внутрішньоклітинної вологи [2].

- швидше вирівнювання температури по всьому об'єму продукту внаслідок менших втрат теплоти у навколишнє середовище.

- уникнення денатурації деяких видів білків, температура денатурації яких є вищою за температуру проведення процесу [3].

- зменшення витрат теплової енергії на обробку 1 кг продукту внаслідок зниження температури проведення процесу та раціонального розподілу теплоти у пакуванні з продуктом.

- з точки зору технології м'яса, важливим є дія обробки в умовах розрідження на колаген, що дозволяє його більш повний перехід у желатин, мінімізуючи повну денатурацію [4].

При детальному розгляді процесу приготування продукту за технологією *Sous Vide*, основними недоліками можуть виступати наступні чинники

- технологія потребує ретельного контролю за якістю матеріалів, що використовуються в процесі пакування продукту. Внаслідок щільного контакту плівки з харчовою сировиною, варто приділяти значну увагу попереджанню проникнення речовин плівки у продукт.

- необхідність ретельного мікробіологічного контролю вхідної сировини та готового продукту. Внаслідок зниження максимальної температури, яка досягається у процесі термічної обробки за технологією *Sous Vide* (з 70-100 при традиційних методах обробки до 50-65 °С для більшості м'ясопродуктів), виникає збільшення загрози розвитку патогенних мікроорганізмів. Тому, при застосовуваних температурах відбувається не повна інактивація деяких груп мікроорганізмів, що вимагає дотримання високих норм мікробіологічної безпеки [4,5]. Використання даної технології є раціональним кроком, що дозволяє не тільки підвищити органолептичні характеристики продуктів і зменшити витрати теплоти, що витрачається на виробництво

продукції, але і досягнути вирішення деяких інших технологічних проблем. Однією із них є обробка м'ясної сировини, що містить у своєму складі велику кількість колагену та сполучної тканини. Іншою вирішуваною проблемою є збільшення виходу готового продукту.

Мета роботи

Зважаючи на наведене вище, доцільним є дослідити питання впливу обробки за технологією *Sous Vide* на різні види м'ясної сировини та основні функціонально-технологічні показники готової продукції протягом терміну зберігання. Таким чином, порівнявши характеристики продукції, де у якості основної сировини використовувались відповідно м'ясо курчат бройлерів (чверть), філе курчат бройлерів, м'ясо качки та яловичина, можна зробити висновки про доцільність застосування даного виду обробки в залежності від виду сировини.

Виклад основного матеріалу

Соус Хойсін – традиційний китайський соус, відомий у всьому світі, завдяки качці по-пекінськи. Володіє солодкуватим, навіть медовим смаком і ароматом прянощів. Густий соус Хойсін готується у вигляді рідини або має желеподібну консистенцію.

Калорійність соусу Хойсін становить 30 ккал на 100 грам продукту. Хімічний склад соусу Хойсін включає в себе: бета-каротин, вітаміни B1, B2, B5, B6, B9, C, E, K і PP, а також калій, кальцій, магній, цинк, селен, мідь і марганець, залізо, фосфор і натрій. Темний колір червоного дерева досягається завдяки присутності в складі соусу Хойсін червоного рису. Основними інгредієнтами соусу Хойсін також є ферментовані соєві боби, часник, цукор, кунжутне масло і суміш китайських спецій (кориця, бодяк сушений мелений, перець сичуанський, фенхель, гвоздика). Аналогами соусу Хойсін в Європі можна вважати британський «коричневий» соус, а в Америці - соус для барбекю [6,7].

Вплив технології *Sous Vide* є темою праць широкого кола дослідників. Висновки переважної більшості досліджень підтверджують позитивний вплив даної технології на органолептичні показники та вихід готового продукту.

У статті М. Ролдана та колег розглянуто вплив різного часу та температури термічної обробки на профіль летких сполук у зразках баранини, приготованою за технологією *Sous Vide* [8]. Експеримент було побудовано з урахуванням двох факторів – часу та температури термічної обробки. Відповідно розроблено 4 зразки баранини – два зразки, які проходили термічну обробку (варіння) при температурі 60°C протягом 6 і 24 год, а також два інші зразки, які варили при температурі 80°C протягом такого ж часу. Аналіз профілю летких сполук підтвердив загальноприйнятту теорію про

ключову роль температури, як фактора, що впливає на смако-ароматичні сполуки м'ясної сировини. Таким чином, встановлено, що основними компонентами профілю летючих сполук баранини є аліфатичні вуглеводні та альдегіди. Внаслідок обробки при 60°C спостерігалось більше збереження речовин, що утворюються в ліпідних фракціях і помірно збереження сполук, що утворюються при руйнуванні амінокислот. При обробці за температури 80°C виявлено погіршення консистенції продукту та зменшення вмісту летких речовин у зразку. Варіння протягом 24 годин позитивно впливало на накопичення ароматичних сполук у зразках, що проходили обробку при 60°C, і не спричиняло помітного ефекту на вміст ароматичних сполук у зразку, що проходив обробку при 80°C. Таким чином, можна зробити висновок про те, що оптимальним режимом обробки є варіння за мінімальних температур (з урахуванням безпечності, тобто не менше, ніж 55–60°C) протягом тривалого часу.

Проте, вартими уваги є праці, у яких підіймається питання терміну зберігання продуктів, оброблених за технологією *Sous Vide*. Проблематику впливу різних видів термічної обробки на текстуру протягом терміну зберігання готового виробу розкрито у дослідженні колективу з Ірландії [9]. Згідно постановки експерименту метою було встановити зміну функціональних характеристик м'ясної сировини – зокрема м'яса зі стегна ВРХ. Таким чином, було передбачено обробку п'яти зразків яловичини, включаючи різні види термічної обробки, серед яких – варіння на циркулюючій водяній бані за температури 75°C до досягнення температури у товщі продукту 70°C, аналогічну обробку попередньо підмороженої сировини, обробку за технологією *Sous Vide* при температурі 75°C протягом 120 хв, аналогічну обробку протягом 270 хв при 60°C та обробку підмороженої сировини в такому ж режимі. Підморожування проводили за температури -20°C протягом 48 годин. Таким чином, серед усіх зразків помітно вищі характеристики (в тому числі органолептичні) виявлено у зразках, приготованих за технологією *Sous Vide*. Застосування даної технології дає можливість досягнути в підмороженому м'ясі високих органолептичних характеристик, що перевищують аналогічні характеристики зразків, приготованих без підморожування на водяній бані. Оптимальним режимом визнано обробку протягом 270 хв при 60°C – такий режим дозволяє значно знизити жорсткість м'яса, а також зберегти максимальну кількість вологи всередині продукту.

Варто також розглянути можливість зберігання продуктів оброблених за технологією *Sous Vide* за умови внесення харчових кислот та інших функціональних інгредієнтів. Частково дана проблематика розкрита у статті колективу вчених з Кореї [10]. Курячу грудку із внесенням лимонної кислоти обробляли за технологією *sous vide* і

зберігали в охолодженому стані протягом 0, 3, 6, 9 і 14 діб. Контрольну групу (курячу грудку без внесення лимонної кислоти) та три групи із різними рівнями внесення лимонної кислоти (0,5%; 2,0%, 5,0%) досліджували за органолептичними та функціональними показниками. Ніжність м'ясної сировини та вміст вологи при варінні зросли у групі із внесенням лимонної кислоти. У той час як почервоніння соку та м'яса у всіх групах показало значне збільшення під час зберігання, почервоніння груп лимонної кислоти зменшилось порівняно з контрольною групою. Відсоток денатурації міоглобіну у дослідній групі також збільшувався відповідно до рівня внесення лимонної кислоти під час зберігання. Загальний показник росту аеробної мікрофлори, кількість ентеробактерій та рівень вмісту летких речовин переважно були нижчими у зразках, оброблених лимонною кислотою, ніж у необроблених, що свідчить про збільшення терміну зберігання вареної курячої грудки, змоченої в розчині лимонної кислоти. Таким чином, за результатами дослідження можна зробити висновок про те, що в ході збільшення термінів зберігання продуктів з курятини варто прагнути до компромісу між зміщенням рН та органолептичних показників за рахунок внесення харчових кислот (також можливо фосфатів та цитратів) та подовженням термінів зберігання.

Питання підвищення органолептичних показників власне і було основною передумовою формування технології *Sous Vide*. З цієї точки зору (оскільки в ході дослідження, представленого в даній статті застосовується соус кухонь Азії) актуальним є підвищення органолептичних показників за рахунок росту кількості вільних амінокислот, які формують ефект, відомий як «п'ятий смак», або «умамі». Питання продукування аутогенного глутамату та супутніх цьому процесу амінокислот розглянуто в роботі Клаусена [11]. У дослідженні розглянуто переважуючу у наукових колах гіпотезу про те, що обробка в середовищі розрідження може призвести до зростання вільного глутамату та вільних амінокислот у м'ясній сировині. Серед видів обробки, при застосуванні яких відбувається найбільше зростання рівня названих вище сполук обрано консервування шляхом стерилізації та ферментування із внесенням протеаз. При дослідженні органолептичних характеристик яловичини, приготованою в умовах середовища розрідження, виявлено зворотній процес – замість накопичення вільних амінокислот та зростання ніжності консистенції протягом першого періоду обробки за температури 65 °C (до 1 год) відбувається ущільнення консистенції продукту. Проте, після досягнення певної критичної точки (від 70 до 85 хв) відбувається різке зростання глутамату та рівня вільних амінокислот. Тому, перспективним є розгляд внесення ферментів у продукти, оброблені за технологією *Sous Vide*.

Обговорення результатів

Згідно плану дослідження було розроблено рецептури зразків, що відрізнялись видом використовуваної м'ясної сировини і також включали в себе соус. Рецептури дослідних зразків представлено у табл. 1.

Етапи підготовки сировини за технологією «Sous Vide»:

1. Перший етап включав приготування соусу Хайсін шляхом змішування інгредієнтів, вказаних у табл.1, після чого готовий соус змішували з основною сировиною та обсмажували протягом 2 хв з кожного боку при температурі 120°C.

2. Підготовлений харчовий продукт поміщали у пакет для створення розрідження за допомогою вакууматора напівавтоматичної дії. За допомогою вакуумного пристрою видаляють повітря і запаюють пакет.

3. Продукт у вакуумній упаковці нагрівали впродовж заздалегідь встановленого часу і при заданій температурі. У спеціальній водяній бані підтримувалась стала температура варіння, чим нижче задана температура, тим триваліший процес приготування. Контроль за температурою здійснювали за допомогою електронного термометра.

Згідно з вимогами до безпеки продукту і його нешкідливості для використання в харчових цілях, м'ясо качки повинно пройти обробку протягом не менше, ніж 63 хвилин при 57,8°C або більше 30 хвилин при 60 ° C [4, 12]. Тому при постановці експерименту передбачаємо обробку усіх зразків при 60°C протягом 1 год.

4. Готовий харчовий продукт піддають «шоковому» охолодженню в шокфрізерах (апаратах швидкого охолодження). Визначена послідовність важлива з таких причин: - для контролю тривалості приготування; - для попередження розмноження бактерій. Рекомендована температура харчового продукту після охолодження знаходиться у межах від 0 до 3°C. Після охолодження продукт зберігали протягом 14 діб при температурі +5°C.

Вміст вологи вимірювали арбітражним методом - висушуванням наважки середньої проби продукту (3-5 г) за температури 120°C протягом 100-120 хв до постійної маси. Вологозв'язуючу здатність вимірювали методом пресування [13]. Вологоутримуючу здатність вимірювали арбітражним методом – порівнянням залишкової та відділеної вологи у зразку [14]. Вміст білків вимірювали біуретовим методом із застосуванням калібрувального графіку [15]. В ході роботи усі показники вимірювались через 7 та 14 днів після термічної обробки зразків у 3 повторах, результати приведено за середніми значеннями.

Як можна бачити з даних, приведених у табл. 2, найвищі функціонально-технологічні характеристики за більшістю досліджуваних показників зафіксовано у зразка 4, рецептура якого включала в себе яловичину.

Проте, варто відзначити, що протягом усього терміну зберігання (14 діб), жоден зразок не показав відсутнього зниження досліджуваних характеристик.

Таблиця 1 – Рецептури дослідних зразків

Назва компоненту	Вміст, %			
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Філе курчат бройлерів	80,0	-	-	-
Філе качки	-	80,0	-	-
Четвертина куряча	-	-	80,0	-
Яловичина	-	-	-	80,0
Соус Хойсин, в тому числі -	20,0			
Перець чилі мелений	1,0			
Квасоля червона консервована	6,0			
Часник свіжий	1,0			
Соєвий соус	6,0			
Оцет рисовий	5,0			
кориця	0,2			
Бодян сушений	0,2			
Перець сичуанський	0,2			
фенхель	0,2			
гвоздика	0,2			
Разом	100,0			

Таблиця 2 – Основні показники дослідних зразків

Показник	Час	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Вміст вологи, %	7 діб	72,4	64,3	74,4	55,3
	14 діб	71,9	62,4	71,6	53,7
ВЗЗ, %	7 діб	64,5	77,1	77,3	78,9
	14 діб	63,4	76,4	74,8	77,2
ВУЗ, %	7 діб	65,7	58,9	76,7	83,2
	14 діб	63,3	56,2	73,8	84,6
рН	7 діб	6,4	6,2	6,6	5,9
	14 діб	5,8	6,0	6,3	5,8
Вміст водорозчинних білків, %	7 діб	10,7	12,1	10,9	11,5
	14 діб	10,2	11	11,2	11,1
Вміст солерозчинних білків, %	7 діб	9,5	11,6	10,9	9,6
	14 діб	9,2	10,8	10,4	9,5

Вміст вологи зразків, рецептура яких включала в себе м'ясо птиці, має більші значення, досягаючи максимуму для зразка 3 після 7 діб зберігання – 74,4 %, а мінімуму – для зразка 2 після 14 діб зберігання,

досягаючи 62,4%. Це може бути пояснене морфологічними та фізико-хімічними властивостями, притаманними м'ясу качки. Зразок 4, рецептура якого включала яловичину, має вміст вологи, який є нижчим за середні значення для даного виду сировини (60-68%) [16]. В усіх зразках показник вмісту вологи не зазнав значних змін протягом зберігання, тому, можна зробити висновок про те, що відмінності у значеннях цього показника для різних видів сировини обумовлені фізико-хімічними особливостями вхідної сировини.

Вологозв'язувальна здатність усіх зразків знаходиться у залежності з консистенцією продукту. Таким чином вона має найнижчі значення серед дослідних зразків для зразка 1, оскільки він включає в свою рецептуру філе курчат бройлерів, яке є більш чутливим до термічної обробки і осмотичних процесів, ніж сировина, що використовувалась у інших зразках.

Максимальне значення ВЗЗ зафіксовано у зразку 4 – 78,9 та 77,2 % відповідно через 7 і 14 діб зберігання. Варто відзначити, що значення ВЗЗ не зазнали відчутного зниження для усіх зразків протягом терміну зберігання, різниця між показником після 7 та 14 діб була не більшою за 3%. Це може свідчити про низький рівень денатурації білків основної сировини. Аналогічні висновки можна зробити і відносно вологоутримуючої здатності. Відмінним є те, що різниця між показниками ВУЗ після 7 та 14 діб зберігання є більшою, ніж аналогічна різниця значень для ВЗЗ, що може бути пояснено природою методу, який використовувався – при повторній термічній обробці в ході вимірювання ВУЗ проходить нагрівання також і жирової фракції продукту, яка має меншу стабільність в ході зберігання після першої термічної обробки [17]. Значення вмісту водо- та солерозчинних білків не продемонстрували великої різниці, проте, вміст водорозчинних білків був більшим для усіх зразків. Варто відзначити зниження цього показника протягом зберігання, що може бути пояснено поступовим переходом білкових речовин з основної сировини у соус та м'ясний сік, що відділився в ході термічної обробки. Найвище значення вмісту білків зафіксовано у зразку 2 після 7 діб зберігання – 12,1 % водорозчинних білків.

Таким чином, можна провести певне порівняння між зразками на основі яловичини та курятини. Зразки на основі яловичини демонструють значно менший вплив обробки на основні функціонально-технологічні показники, а також мають менш ніжню консистенцію, проте, при їх обробці не постає питання кольороутворення або внесення барвників, з огляду на високий вміст у яловичині смако-ароматичних та забарвлюючих речовин [18]. М'ясо курятини в свою чергу демонструє більший вплив внесення соусу та обробки в умовах розрідження, проте, з огляду на меншу кількість як і загального білку, так і водорозчинних

білків, потребує більшого відсотку внесення смако-ароматичних речовин. Також актуальним є внесення функціональних інгредієнтів для ущільнення консистенції м'яса стегна курчат-бройлерів (варто зауважити, що дане питання не є актуальним для філе курятини). Серед функціональних інгредієнтів, які можуть подовжити терміни зберігання та поліпшити органолептичні показники курятини, можна розглядати цитратно-фосфатні розсоли. Питанням, яке потребує більш детального розкриття є вплив даних функціональних інгредієнтів на перебіг автолітичних процесів в присутності ферментів. Для корегування ефекту «умамі» та органолептичних показників, як і для яловичини, так і для курятини можна розглядати такі ензими, як бромелайн та папаїн [19, 20].

Висновки

У результаті проведених досліджень для продуктів з використанням традиційних видів м'ясної сировини і м'яса птиці, що в процесі зберігання не відбувається суттєвого перерозподілу і зміни вмісту вологи протягом 14 діб зберігання.

Визначено, що зміна вологозв'язуючої та вологоутримуючої здатностей готового продукту протягом зберігання корелюється зі зміною вмісту вологи в зразках.

Визначено вміст водо- та солерозчинних білків для продуктів на основі яловичини, курятини та м'яса качки. Найвищий рівень водорозчинних білків зафіксовано у продукті на основі м'яса качки після 7 діб зберігання. Зафіксовано зниження вмісту білка для усіх зразків, що може бути пояснене процесами переходу білків у рідку фазу соусу протягом зберігання.

Отримані результати підтверджують позитивний вплив обробки за технологією *Sous Vid* на показники досліджуваних видів сировини, що дозволяє рекомендувати даний тип обробки в поєднанні з попередньою кулінарною обробкою.

В подальших дослідженнях необхідно уточнити вплив режимів теплової обробки за технологією *Sous Vid* на мікробіологічні показники продукції для обґрунтування раціональних термінів її зберігання зі збереженням високих функціонально-технологічних органолептичних показників продукції.

Список літератури

1. **Пасічний, В. М.** Використання модифікованого газового середовища та вакуумування при пакуванні і зберіганні охолодженого м'яса та напівфабрикатів з нього / **В. М. Пасічний, О. В. Храпачов, А. І. Маринін** // *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія : Харчові технології.* – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 68-72. – doi: 10.15421/nvlvet6813.
2. **Арпуть, О. В.** Перспективи впровадження "Sous Vide" технології у закладах ресторанного господарства / **О. В. Арпуть, О. М. Усатюк, В. В. Удовицький** // *Наукові*

- праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2013. – Вип. 44(2). – С. 341-345.
3. **Zielbauer, B. I.** Physical aspects of meat cooking: time dependent thermal denaturation and water loss / **B.I. Zielbauer, Franz, J., Viezens, B., & Vilgis, T. A.** // *Food biophysics*. – 2016. – 11.1 – P. 34-42. – doi: 10.1007/s11483-015-9410-7.
 4. **Baldwin, Douglas E.** Sous vide cooking: A review / **Douglas E. Baldwin** // *International Journal of Gastronomy and Food Science*. – 2012.– 1.1. – P. 15-30. – doi: 10.1016/j.ijgfs.2011.11.002.
 5. **Українець, А. І.** Обґрунтування термінів зберігання варених ковбасних виробів з м'ясом курчат бройлерів / **А. І. Українець, В. М. Пасічний, Ю. В. Желуденко, С. П. Задкова** // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2016. – Т. 22, № 5. – С. 222-229.
 6. **Lee, Soh Min.** Exploration of flavor familiarity effect in Korean and US consumers' hot sauces perceptions / **Lee, S. M., Kim, S. E., Guinard, J. X., & Kim, K. O.** // *Food Science and Biotechnology*. – 2016. – 25.3 – P. 745-756. – doi: 10.1007/s10068-016-0128-1.
 7. **Yusop, Salma Mohamad.** Sensory evaluation of Chinese-style marinated chicken by Chinese and European naïve assessors / **Yusop, S. M., O'sullivan, M. G., Kerry, J. F., & Kerry, J. P.** // *Journal of Sensory Studies*. – 2009. – 24.4 – P. 512-533. – doi: 10.1111/j.1745-459X.2009.00224.x.
 8. **Roldán, Mar.** Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature-time combinations / **Roldán, M., Ruiz, J., del Pulgar, J. S., Pérez-Palacios, T., & Antequera, T.** // *Meat science*. – 2015. – 100 – P. 52-57. – doi: 10.1016/j.meatsci.2014.09.010.
 9. **Botinestean, Cristina.** The effect of thermal treatments including sous-vide, blast freezing and their combinations on beef tenderness of M. semitendinosus steaks targeted at elderly consumers / **Botinestean, C., Keenan, D. F., Kerry, J. P., & Hamill, R. M.** // *LWT*. – 2016. – 74 – P. 154-159. – doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.026.
 10. **Kim, Ji-Han.** Influence of citric acid on the pink color and characteristics of sous vide processed chicken breasts during chill storage / **Kim, J. H., Hong, G. E., Lim, K. W., Park, W., & Lee, C. H.** // *Korean journal for food science of animal resources*. – 2015. – 35.5. – P. 585. – doi: 10.5851/ksfa.2015.35.5.585.
 11. **Clausen, Mathias P.** The quest for umami: Can sous vide contribute? / **Clausen, M. P., Christensen, M., Djurhuus, T. H., Duelund, L., & Mouritsen, O. G.** // *International Journal of Gastronomy and Food Science*. – 2018. – 13. – P. 129-133. – doi: 10.1016/j.ijgfs.2018.03.002.
 12. **Пасічний, В. М.** Дослідження факторів пролонгації термінів зберігання м'ясних і м'ясомістких продуктів / **В. М. Пасічний, А. М. Гередчук, О. О. Мороз, Ю. А. Ястреба** // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 224-230.
 13. **Шведюк, Д. А.** Дослідження фізико-хімічних властивостей напівфабрикатів м'ясних з додаванням білково-жирових емульсій на основі купажованих жирів / **Д. А. Шведюк, В. М. Пасічний, Ж.І. Прохоренко** // *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 42 (1214). – С. 223-227. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.36.
 14. **Пасічний, В. М.** Стабілізація показників напівкопчених ковбаси з м'ясом птиці / **В.М. Пасічний, О.О. Мороз, С.М. Мітєєва** // *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького*. – 2009. – 3 (42). – С. 69-72.
 15. **Baldassini, Welder Angelo.** Bioanalytical methods for the metalloproteomics study of bovine longissimus thoracis muscle tissue with different grades of meat tenderness in the Nellore breed (*Bos indicus*) / **Baldassini, W. A., Braga, C. P., Chardulo, L. A. L., Silva, J. A. I. V., Malheiros, J. M., de Albuquerque, L. G.** // *Food chemistry*. – 2015. – 169 – P. 65-72. – doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.131.
 16. **Zheng, Chaixin, Liyun.** Correlating colour to moisture content of large cooked beef joints by computer vision / **Zheng, C., Sun, D. W., Zheng, L.** // *Journal of Food Engineering*. – 2006. – 77.4 – P. 858-863. – doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.013.
 17. **Пасічний, В. М.** Використання повторної пастеризації при виготовленні варених ковбасних виробів / **В.М. Пасічний, О.В. Храпачов, А.І. Українець, А.І. Маринін, Н.П. Лановенко, Е.І. Капітула** // *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія : Харчові технології*. – 2018. – Т. 20(85). – С. 29-34. – doi: 10.15421/nvlvet8506.
 18. **Тищенко, В. І.** Розробка рецептури полікомпонентних м'ясних хлібів на основі фаршу прісноводної риби / **В. І. Тищенко, Н. В. Божко, В. М. Пасічний** // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 172-178.
 19. **Пасічний, В. М.** Біологічна цінність кров'яних ковбас з використанням сухої молочної сироватки / **В. М. Пасічний, О. В. Кочубей-Литвиненко, А. І. Маринін, Д. В. Гармаш, Р. С. Святненко** // *Вісник ХНТУ*. – 2018. – № 2(65). – С. 137-142.
 20. **Garmash, D.V.** Features and prospects of using collagenase-containing enzyme compositions in the meat-based products technology / **D.V. Garmash, V.M. Pasichnyi** // *Ukrainian Journal of Food Science*. – 2017. – P. 231-236.

References (transliterated)

1. **Pasichnyi, V. M., Khrapachov, O. V., Marynin, A. I.** Vykorystannia modyfikovanoho hazovoho seredovyschcha ta vakuuvannia pry pakuvanni i zberihanni okholodzhenoho miasa ta napivfabrykativ z noho [Use of modified gas environment and evacuation when packing and storing chilled meat and semi-finished products]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S.Z. Gzhytskoho [Scientific Bulletin of the Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after S.Z. Gzhytskyi. Series: Food Technology]*, 2016, 18, 2, 68-72, doi: 10.15421/nvlvet6813.
2. **Arpul, O. V., Usatiuk, O. M., Udovytskyi, V. V.** Perspektyvy vprovadzhennia Sous Vide tekhnolohii u zakladakh restorannoho hospodarstva. [Prospects for Sous Vide technology implementation in restaurants] *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii [Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies]*, 2013, 44 (2), 341-345.
3. **Zielbauer, Birgitta I., et al.** Physical aspects of meat cooking: time dependent thermal protein denaturation and water loss. *Food biophysics*, 2016, 11.1, 34-42, doi: 10.1007/s11483-015-9410-7.

4. **Baldwin, Douglas E.** Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2012, **1.1**, 15-30.
5. **Ukrainets, A. I., Pasichnyi, V. M., Zheludenko, Yu. V., Zadkova, S. P.** Obgruntuvannya terminiv zberihannya varenykh kovbasnykh vyrobiv z miasom kurchat broileriv [Justification of the shelf life of cooked sausages with broiler chickens]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii [Scientific papers of the National University of Food Technologies]*, 2016, **22**, 5, 222-229.
6. **Lee, Soh Min, et al.** Exploration of flavor familiarity effect in Korean and US consumers' hot sauces perceptions. *Food Science and Biotechnology*, 2016, **25.3**, 745-756, doi: 10.1007/s10068-016-0128-1.
7. **Yusop, Salma Mohamad, et al.** Sensory evaluation of Chinese-style marinated chicken by Chinese and European naïve assessors. *Journal of Sensory Studies*, 2009, **24.4**, 512-533, doi: 10.1111/j.1745-459X.2009.00224.x.
8. **Roldán, Mar, et al.** Volatile compound profile of sous-vide cooked lamb loins at different temperature–time combinations. *Meat science*, 2015, **100**, 52-57, doi: 10.1016/j.meatsci.2014.09.010.
9. **Botinestean, Cristina, et al.** The effect of thermal treatments including sous-vide, blast freezing and their combinations on beef tenderness of M. semitendinosus steaks targeted at elderly consumers. *LWT*, 2016, **74**, 154-159, doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.026.
10. **Kim, Ji-Han, et al.** Influence of citric acid on the pink color and characteristics of sous vide processed chicken breasts during chill storage. *Korean journal for food science of animal resources*, 2015, **35.5**, 585, doi: 10.1016/j.lwt.2016.07.026.
11. **Clausen, Mathias P., et al.** The quest for umami: Can sous vide contribute? *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2018, **13**, 129-133.
12. **Pasichnyi, V. M., Heredchuk, A. M., Moroz, O. O., Yastreba, Yu. A.** Doslidzhennia faktoriv prolonhatsii terminiv zberihannya miasnykh i miasomistkykh produktiv [Investigation of the shelf life factors of meat and meat products]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii [Scientific papers of the National University of Food Technologies]*, 2015, **21**, 4: 224-230, doi: 10.1016/j.ijgfs.2018.03.002.
13. **Shvediuk, D. A., Pasichnyi, V. M., Prokhorenko Zh. I.** Doslidzhennia fizyko-khimichnykh vlastyvostei napivfabrykativ miasnykh z dodavanniam bilkovo-zhyrovnykh emulsii na osnovi kupazhovanykh zhyriv [Investigation of the physicochemical properties of semi-finished meat products with the addition of protein-fat emulsions based on blended fats]. *Visnyk NTU «KhPI», Seria: Novi rishehnia v suchasnykh tekhnolohiakh [Bulletin of NTU "KPI". Series: New solutions in modern technologies]*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2016, **42** (1214), 223-227, doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.36.
14. **Pasichnyi, V. M., Moroz, O. O., Mitiaieva, S. M.** Stabilizatsiia pokaznykiv napivkopcheni kovbasy z miasom ptytsi [Stabilization of half-smoked poultry with poultry meat]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S.Z. Gzhytskoho [Scientific Bulletin of the Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after S.Z. Gzhytskiy]*, 2009, **3** (42), 69-72.
15. **Baldassini, Welder Angelo, et al.** Bioanalytical methods for the metalloproteomics study of bovine longissimus thoracis muscle tissue with different grades of meat tenderness in the Nellore breed (*Bos indicus*). *Food chemistry*, 2015, **169**, 65-72, doi: 10.1016/j.foodchem.2014.07.131.
16. **Zheng, Chaixin, Sun, Da-Wen, Zheng, Liyun.** Correlating colour to moisture content of large cooked beef joints by computer vision. *Journal of Food Engineering*, 2006, **77.4**: 858-863, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.013.
17. **Pasichnyi, V. M., Khrapachov, O. V., Ukrainets, A. I., Marynin, A. I., Lohvynenko, N. P., Kapitula, E. I.** Vykorystannia povtornoii pasteryzatsii pry vyhotovlenni varenykh kovbasnykh vyrobiv [The use of re-pasteurization in the manufacture of cooked sausage products]. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2018, **20**(85), 29-34, doi: 10.15421/nvlvet8506.
18. **Пасічний, В. М., Крешна, І. В.** Stabilizatsiia tekhnolohichnykh vlastyvostei fermentovanoho rysu dlia vyrobnytstva miasoproduktiv [Stabilization of the technological properties of fermented rice for the production of meat products]. *Nauk. pr. Nats. un-tu kharch. Tekhnologii [Science. Nat. un. food. technologies]*, 2004, **15**, 49-50.
19. **Pasichnyi, V. M., Kochubei-Lytvynenko, O. V., Marynin, A. I., Harmash, D. V., Sviatnenko, R. S.** Biolohichna tsinnist krovianykh kovbas z vykorystanniam sukhoi molochnoi syrovatky [The biological value of blood sausages using powder]. *VISNYK KhNTU [Bulletin of the KhNTU]*, 2018, **2**(65), 137-142.
20. **Garmash, Dmytro, Pasichnyi, Vasyly.** Features and prospects of using collagenase-containing enzyme compositions in the meat-based products technology. *Ukrainian Journal of Food Science*, 2017, 231.

Інформація про авторів (About authors)

Гармаш Дмитро Вікторович – аспірант, Проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ; ORCID: 0000-0002-9591-9364; e-mail: garmash93@gmail.com.

Dmytro Garmash – postgraduate, National University of Food Technologies, Problematic scientific-research laboratory, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9591-9364; e-mail: garmash93@gmail.com.

Пасічний Василь Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, завідувач кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-0138-5590; e-mail: pasww1@ukr.net.

Vasyly Pasichnyi – Doctor of Science, Professor, National University of Food Technologies, Head of the Department of meat and meat products, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0138-5590; e-mail: pasww1@ukr.net.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гармаш, Д. В. Вплив застосування технології sous vide на функціонально-технологічні характеристики продуктів на основі різних видів м'ясої сировини / **Д. В. Гармаш, В. М. Пасичний** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 67-74. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08.

Please cite this article as:

Garmash, D., Pasichnyi, V. The impact of sous vide technology application on the functional and technological characteristics of products based on different types of meat stuff. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 67-74, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гармаш, Д. В. Влияние применения технологии sous vide на функционально-технологические характеристики продуктов на основе различных видов мясного сырья / **Д. В. Гармаш, В. М. Пасичный** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 67-74. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08.

АННОТАЦИЯ В работе рассмотрено влияние обработки по технологии Sous Vide продуктов на основе мяса птицы (филе цыплят-бройлеров, четверти цыплят-бройлеров и мяса утки) и говядины на основные функционально-технологические характеристики готового продукта. Согласно плану исследования был разработан рецептуры образцов, отличались видом используемой мясного сырья и также включали в себя соус Хойсин. Рецептуры всех образцов включали в себя 80% основной мясного сырья (филе цыплят бройлеров, мясо утки, четверть цыплят-бройлеров и говядину соответственно для образцов 1-4) и 20% соуса Хойсин. Обработку продуктов проводили одинаковым методом, включая: приготовление соуса, смешивания основного сырья с соусом, обжаривание при 120⁰ С в течение 2 мин с каждой стороны продукта, упаковки в полимерные пакеты с созданием разрежения на вакуум-аппарате, варки упакованных образцов в течение 1 ч при 60⁰ С, охлаждения шоковым методом и хранения в течение 14 суток. Среди исследуемых показателей избран содержание влаги, влагосвязывающую (ОВС) и влагоудерживающую (ВУЗ) способности, содержание водо- и солерастворимых белков. Все показатели измеряли после 7 и 14 суток хранения по 3 раза каждый. значение принято средними. Значение содержания влаги было характерно для используемого сырья и достигало максимального значения для для образца 3 после 7 суток хранения - 74,4%, а минимума - для образца 2 после 14 суток хранения - 62,4%. Влагосвязывающая способность всех образцов находится в зависимости с консистенцией продукта. Таким образом она имеет самые низкие значения среди опытных образцов для образца 1, поскольку он включает в свою рецептуру филе цыплят бройлеров, которое является более чувствительным к термической обработке и осмотических процессов, чем сырье, используемой в других образцах. Максимальное значение ОВС зафиксировано в образце 4 - 78,9 и 77,2% соответственно через 7 и 14 суток хранения. Из рассмотренных источников и проведенной работы можно сделать выводы о том, что обработка по технологии Sous Vid положительно влияет на все исследуемые виды основного сырья, включая мясо утки, и может успешно комбинироваться с предыдущей кулинарной обработкой.

Ключевые слова: технология Sous Vide; вакуум; мясо птицы; мясо утки; функционально-технологические свойства; срок хранения

Поступила (received) 28.08.2019

УДК 641.05:612.825.8:004.942

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.09

ПРОЕКТУВАННЯ ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ СОУСІВ ДІЄТИЧНОЇ СПРЯМОВАНОСТІ

Н. А. ДЗЮБА*¹, Д. А. СІРОЦІНСЬКА²

¹ кафедра Технології ресторанного і оздоровчого харчування, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, УКРАЇНА

² шеф-кухар ресторану «Urban Space 100», м. Івано-Франківськ, УКРАЇНА

* e-mail: dzyubanadya282@gmail.com

АНОТАЦІЯ Одними з основних напрямків в області проектування харчових продуктів є: розробка рецептур і технологій продуктів масового споживання; функціональних і спеціалізованих харчових продуктів, в тому числі збагачених есенціальними мікронутрієнтами; моделювання рецептурних сумішей різних груп готових продуктів з урахуванням обсягів їх споживання, особливостей технології виробництва, що забезпечують збереження внесених і ендогенних нутрієнтів. При розробці композиційного складу соусів було приділено значну увагу нутрієнтному складу сировини, його зміні при технологічній обробці та збалансованості. Розроблені рецептури полікомпонентних соусів на основі йогурту, кінзи, перцю чилі та кунжуту. Визначено фізико-хімічні показники отриманих соусів, проведено аналіз таких показників як амінокислотний скор та вміст мікронутрієнтів. Розроблені продукти відрізняються досить високим вмістом всіх основних, необхідних для організму людини мікронутрієнтів, а саме кальцію, магнію, фосфору та калію. Дослідження складу мікронутрієнтів показало, що споживання 100 г соусу «Дієтичний» задовольняє потреби людини в вітамінах А та В₂ на 29 та 10.37 % відповідно. Моделювання умов зберігання за допомогою ALST тесту за оцінкою зміни мікробіологічних та органолептичних показників дає можливість стверджувати, що соуси будуть конкурентоспроможними на споживчому ринку України. Отримані дані дослідження якісних показників показали, що при зберіганні протягом 4 днів при температурі (12±5) °С вологістю 70–75 % в скляній та пластиковій тарі, вміст санітарно-показових мікроорганізмів відповідає санітарно-гігієнічним вимогам до соусів. Розроблені продукти мають високий вміст білкових речовин, що є досить важливо з точки зору забезпечення потреб організму сучасної людини. Розроблені соуси можуть бути рекомендовані для вживання підлітками, дітьми, дієтичному харчуванні, та споживання інших верств населення.

Ключові слова: математичне моделювання; показники якості; соус; гідролізат колагену; збалансований нутрієнтний склад; сенсорні показники

DESIGNING OF MULTICOMPONENT SAUCES OF DIETARY ORIENTATIONS

N. DZYUBA*¹, D. SIROTSINSKA²

¹Department Technologies of restaurant and health nutrition, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, UKRAINE

² Chef of the restaurant "Urban Space 100", Ivano-Frankivsk, UKRAINE

ABSTRACT Compound sauce recipes have been developed on the basis of yogurt, cilantro, chili and sesame pepper. One of the main directions in the design of food products is: the development of recipes and technologies of mass consumption products; functional and specialized food products, including those enriched with essential micronutrients; modeling of prescription mixtures of different groups of finished products taking into account the volumes of their consumption, features of production technology, which ensure the preservation of introduced and endogenous nutrients. In the development of the composition composition of sauces, considerable attention was paid to the intricacies of raw materials, their changes in technological processing and balance. Physical and chemical parameters of the obtained sauces were determined, analysis of such parameters as amino acid score and micronutrient content was performed. The developed products differ in the high enough content of all the basic micronutrients necessary for the human body, namely calcium, magnesium, phosphorus and potassium. The study of micronutrients showed that the consumption of 100 grams of "Diet" sauce meets the human needs in vitamins A and B₂ at 29 and 10.37% respectively. Modeling storage conditions by using the ALST assessment test in terms of change in the microbiological and organoleptic parameters allows us to confirm that the sauces will be competitive in the consumer market of Ukraine. The obtained data of the study of qualitative indicators showed that when stored for 4 days at a temperature (12 ± 5) °C with a moisture content of 70-75% in glass and plastic containers, the content of sanitary indicative microorganisms meets the sanitary hygiene requirements for sauces. Developed foods have high protein content, which is very important in terms of meeting the needs of the body of a modern person. The sauces developed can be recommended for use by adolescents, children, dietary eating, and consumption of other groups of the population.

Keywords: mathematical modeling; Quality Scores; sauce; hydrolyzate of collagen, balanced nutrient composition; sensory indicators

Вступ

Відомо, що здоров'я людини залежить від основних чинників: на 50 % людського чинника з них

харчування складає 40 %, фізичне навантаження – 10 %, психічний стан – 8 %), антропогенного стану – 25 %. Соціально-педагогічний показник впливає на здоров'я майже на 30 % [1]

Статистика ВООЗ така, що умовно-здоровими можна вважати лише 20 % дорослого населення. Ще стільки ж перебувають в стані перед хвороби, а 22 % мають більше двох хронічних захворювань, у решти 38 % організм знаходиться в стані виснаження, при якому він не може самостійно протистояти хворобі. Серед дітей тільки 2 % з усіх випускників шкіл можна вважати абсолютно здоровими [2].

Сучасне харчування не відповідає основним принципам здорового харчування і дієтології. У раціоні сучасної людини багато хлібобулочних виробів, картоплі та мало основних джерел повноцінного білка (м'ясних, рибних та молочних продуктів), клітковини, мікронутрієнтів (овочі, фрукти, горіхи тощо) [3,4]. Результати досліджень фактичного стану харчування населення в різних регіонах світу свідчать про те, що структура харчування і харчовий статус як дитячого, так і дорослого населення характеризується серйозними порушеннями. Серед них дефіцит повноцінних (тваринних) білків, поліненасичених жирних кислот, вітамінів, макро- і мікроелементів, харчових волокон. І, навпаки, спостерігається надлишкове споживання тваринних жирів і легкозасвоюваних вуглеводів [3]. Спостерігається дефіцит споживання більшості вітамінів і мікроелементів, харчових волокон, які є необхідними для організму людини [3,5–8]. При цьому розповсюдженість ожиріння серед людей віком старше 45 років становить 52 %, надмірної ваги тіла – 33 % [3].

До пріоритетних напрямків сучасної науки належать організація здорового харчування, створення продуктів харчування з метою профілактики аліментарних захворювань. Для цього проводять інформатизацію щодо здорового харчування серед населення за допомогою комунікаційних ресурсів.

В останні роки, при вирішенні проблеми забезпечення населення раціональним харчуванням усе більшого значення набуває виробництво низькокалорійних продуктів оздоровчого призначення [9-12]. Як відомо, продукти здорового харчування повинні містити в достатній та збалансованій кількості різноманітні інгредієнти. Білки, жири, вуглеводи, мінеральні речовини, вітаміни та інші біологічно активні компоненти проявляють специфічну фізіологічну активність, яка доповнює сенсорні та поживні властивості продуктів [10,11].

Тому актуальним є підвищення харчової та біологічної цінності соусів, що може бути досягнуто шляхом збагачення їх білковими речовинами. Це дозволить знизити рівень білкової недостатності серед різних верств населення.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одними з основних напрямків в області проектування харчових продуктів є: розробка

рецептур і технологій продуктів масового споживання; функціональних і спеціалізованих харчових продуктів, в тому числі збагачених есенціальними мікронутрієнтами; моделювання рецептурних сумішей різних груп готових продуктів з урахуванням обсягів їх споживання, особливостей технології виробництва, що забезпечують збереження внесених і ендогенних нутрієнтів [13].

При проектуванні продуктів складного рецептурного складу використовують основний принцип теорії збалансованого харчування – харчові нутрієнти мають надходити до організму людини в певній кількості і співвідношенні. Підбираючи склад рецептурних інгредієнтів, збагачуючи їх функціональними нутрієнтами, можна домогтися певної спрямованості фізіологічного впливу [14,15].

Харчова цінність соусів залежить від харчової цінності тих продуктів, які входять до їх складу. Їх готують з борошном на молоці чи на бульйоні з кісток, грибів, м'яса або риби, без борошна на вершковому маслі, олії, з додаванням оцту.

Соуси, приготовлені на м'ясних бульйонах з великою кількістю екстрактивних речовин, збуджують апетит. Багатьом стравам соуси надають соковитості, що полегшує засвоюваність страви. Тушкування м'яса з гострими соусами сприяє переходу колагену в Гідролізат колагену і розм'якшенню м'яса. Завдяки соусам з того самого продукту можна приготувати різні за смаком страви.

Білки, жири і вуглеводи в соусах легко засвоюються організмом. Крім того, використовуючи соус, страві можна надати гарного зовнішнього вигляду. Наприклад, червоний маринад відтіняє білий колір риби. Багато соусів доповнюють склад страв, підвищують їхню калорійність. Соусами поливають основний продукт або гарнір, заправляють ними супи або подають до страв окремо в металевих або порцелянових соусниках, які ставлять поряд з блюдцем на тарілочки.

Основні моностабілізатори структури, які пропонуються ринком і входять до складу стабілізаційних систем при виробництві соусів: камедь гуару, камедь ксантану, карагенани, пектини, крохмалі [16,17] псиліум [18], гідролізат колагену [19].

З метою підвищення харчової й біологічної цінності, а також для покращення органолептичних показників до складу соусів додають зародки пшениці [20]. Новим напрямком в технології приготування соусів є поєднання білків тваринної сировини і різноманітної рослинної сировини (зерно, овочі, фрукти).

Також використовують для збагачення біологічно цінними речовинами соус з додаванням молочної сироватки та пектину [21]. Це дає можливість повністю виключити застосування стабілізаційних систем, штучних регуляторів кислотності та консервантів, збагатити продукт біологічно цінними сироватковими білками,

молочнокислими організмами, а також рослинними антиоксидантами.

Відома технологія отримання соусу, де в якості основної сировини використовували фруктово-овочеві пюре (гарбузове, яблучне, бананове та ін.). В якості освітлювальної сировини виступала лимонна кислота. [22].

Розроблено технологію отримання соусів на основі обліпихової сировини [23]. В якості основних компонентів використовували пюре: обліпихове та яблучне, а також екстракт стевії для під солодження соусу. Встановлено, що обліпиховий компонент в якості наповнювача підвищує харчові властивості продукту. Використання цукру є не найкращим, особливо для людей хворих на цукровий діабет, тому використовується екстракт стевії як натуральний замісник цукру.

В даний час на світовому ринку харчових технологій спостерігається тенденція до збільшення кількості якісно нових продуктів. Для профілактики різних захворювань, зміцнення захисних сил організму, зниження ризику впливу токсичних сполук і несприятливої екологічної дії використовують різну рослинну сировину.

За допомогою спеціальної технологічної обробки і додаткового включення в рецептуру дієтичних і профілактичних добавок забезпечується поліпшення якості та харчової цінності страв і продуктів, а також надаються їм властивості спеціального або лікувально-профілактичного профілю.

Таким чином, перспективним є розробка композиції та технології виробництва нового соусу, а також визначення його показників якості.

Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробка композиції та технології виробництва нового дієтичного соусу. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести скринінг сировини для виробництва соусу;
- розробити композицію соусу, що містить високий вміст вітамінів і мінеральних речовин;
- розробити технологію виробництва нового соусу;
- визначити зміст основних макро- і мікронутрієнтів;
- визначити товарознавчу характеристику та оптимальні терміни зберігання готового продукту.

Матеріали і методи розробки соусів

Дослідження проводилися на базі сучасних наукових лабораторій:

- консалтингова лабораторія здорового харчування;
- проблемна науково-дослідницька лабораторія комплексної переробки рослинної сировини в харчові ті кормові продукти;

Для виготовлення соусів використовували наступне устаткування:

- для приготування соусу використовували холодильну шафу (ШХ–0,4 МС, Республіка Марій Ел, Росія), електричну плитку (ПЕ–4ш, Росія), умивальник.
- для визначення кислотності – ваги лабораторні, колба, циліндр, бюретка, фенолфталеїн, гідроксид натрію.
- для визначення плинності – Консистометри Боствік (Росія);
- для визначення сухих речовин – прилад Чижової; секундомір; технічні ваги; ексікатор; термометри з межею вимірювання 200—250°C; ножиці; фарфорова ступка; папір ротаторний.

Для проведення дослідження використовували наступну сировину: йогурт (ДСТУ 4343:2004), кінзу (ДСТУ 2175-93), перець чилі (ДСТУ 4436), кунжут (ГОСТ 12095-76), псиліум, гідролізат колагену [14].

Оптимізацію рецептури соусових композицій за основними показниками хімічного складу, що відповідають рекомендованим потребам людини, проводили за допомогою математичного моделювання. Реалізація математичного моделювання композиційного складу соусів була вирішена за допомогою лінійного програмування з використанням редактора MS Excel.

Умови оптимізації рецептури соусу були представлені у вигляді комплексу математичних рівнянь.

Для прогнозування фактичного терміну зберігання соусу використовували тест ASLT, що дозволило дослідити зміни товарознавчих показників і показників безпеки продукту від часу і температури його зберігання. Основними показниками якості були органолептичні і мікробіологічні показники. Виготовлена соусна композиція була розділена на зразки масою по 100г, які зберігали при температурах від 10° С до 25 ° С, з кроком в 5 ° С, протягом 4 діб з кроком в 1 день.

Згідно з ДСТУ ISO 6658:2005 органолептичний аналіз проводили шляхом аналітичної оцінки описовим методом (метод профілювання) та методом використання шкал та категорій (оцінка за допомогою балової шкали).

Результати. При проектуванні рецептури соусу-соусу необхідно було досягти мети – максимальної цінності продукту з наступним змістом нутрієнтів (в 100 г готового продукту):

- жирів – не більше 10 %;
- моноуглеводів – не більше 7 % і не менше 3 %;
- сухих речовин – не більше 25 % і не менше 19 %;
- білків – не менше 3.5 %.

Виклад основного матеріалу

При розробці композиційного складу соусу було приділено значну увагу нутрієнтному складу сировини, його зміні при технологічній обробці та

збалансованості. В основу поставлена задача розробити та провести оптимізацію рецептури для виробництва соусу, в який шляхом введення додаткового компонента забезпечить підвищення харчової і біологічної цінності готового продукту, а також розширення асортименту.

Метою оптимізації рецептури нового продукту стало визначення оптимального їх співвідношення.

Обмеження за вмістом компонентів для розробки нового виду соусу представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Обмеження на рецептурний вміст (г на 100 г готового продукту)

Рецептурний компонент	Вміст в композиції соусу «Дієтичний», г		Вміст в композиції соусу «Дієтичний+ псиліум», г		Вміст в композиції соусу «Дієтичний+ гідролізат колагену», г	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Йогурт	80	90	80	90	80	90
Кінза	2	3	2	3	2	3
Пластівці чілі	1	2	1	2	1	2
Лимонний сік	1	2	1	2	1	2
Кунжут	2	3	2	3	2	3
Псиліум	-	-	1	2	-	-
Гідролізат колагену	-	-	-	-	1	2

Оформлення розрахунків в MS Excel наведено на рис. 1. Оптимізацію рецептур проводили в програмі «Поиск решений» (у оригіналі Excel Solver) – додаткова надбудова табличного процесора MS Excel, яка призначена для вирішення певних систем рівнянь, лінійних та нелінійних завдань оптимізації. Для того, щоб вирішити задачу ЛП в табличному редакторі Microsoft Excel, необхідно виконати наступні дії [31]:

1. Ввести умову задачі:

– створити екранну форму для введення умови задачі: змінних; цільової функції (ЦФ); обмежень; граничних умов;

– ввести вихідні дані в екранну форму: коефіцієнти ЦФ; коефіцієнти при змінних в обмеженнях; праві частини обмежень;

– ввести залежності з математичної моделі в екранну форму: формулу для розрахунку ЦФ; формули для розрахунку значень лівих частин обмежень;

– задати ЦФ (у вікні "Поиск решения"): цільову комірку; напрям оптимізації ЦФ;

– ввести обмеження і граничні умови (у вікні "Поиск решения"): комірки із значеннями змінних; граничні умови для допустимих значень змінних; співвідношення між правими і лівими частинами обмежень.

2. Вирішити задачу:

– встановити параметри рішення задачі (у вікні "Поиск решения");

– запустити завдання на рішення (у вікні "Поиск решения");

– вибрати формат виведення рішення (у вікні "Результаты поиска решения").

В табл. 2 представлена матриця даних для проектування рецептури соусів, що включає в себе наступні блоки: рецептурні інгредієнти (PI), можливий діапазон варіювання PI, вміст сухих речовин PI та індексовані змінні. У табл. 3 наведена харчова цінність PI.

Таблиця 2 – Інформаційна матриця даних для проектування рецептури соусу

Рецептурний інгредієнт	Індекс, X_i	Можливий діапазон варіювання PI, %	Вміст сухих речовин PI, %
Йогурт	X_1	80-90%	36
Кінза	X_2	2-3%	6.05
Пластівці чілі	X_3	1-2%	0.4
Лимонний сік	X_4	1-2%	0.83
Кунжут	X_5	2-3%	17.2
Псиліум	X_6	1-2%	88.56
Гідролізат колагену	X_7	1-2%	70

При встановленні обмежень керувалися фізіологічними потребами людини в біологічно активних речовинах.

Таблиця 3 – Харчова цінність рецептурних інгредієнтів соусу

Нутрієнти	Кількість нутрієнтів рецептурних інгредієнтів, г						
	Йогурт	Кінза	Перець чілі	Лимонний сік	Кунжут	Псиліум	Гідролізат колагену
Білок	4	0.3	0.2	0.04	3.88	1.5	70
Моноуглеводи	2.5	5.4	0.04	0.64	2.44	1.46	0
Жир	9.3	0	0	0.03	9.74	0.6	0
Сухі речовини	36	6.05	0.4	0.83	17.2	88.5	0.75
Всього	51.8	11.8	0.64	1.54	33.3	92.1	70.7

Цільова функція – максимальна харчова цінність проектованого продукту, визначається як сума харчової цінності складових частин PI, маса яких складається з рецептури:

$$F(x) = 51.8 \cdot x_1 + 11.8 \cdot x_2 + 0.64 \cdot x_3 + 1.54 \cdot x_4 + 33.3 \cdot x_5 \rightarrow \max$$

На підставі інформаційної матриці даних формуємо систему лінійних балансових рівнянь за змістом в рецептурі білків, жирів, моноуглеводів, при дотриманні обмежень:

наявність в рецептурі білку не менше 3.5 %:

$$4 \cdot x_1 + 0.3 \cdot x_2 + 0.2 \cdot x_3 + 0.04 \cdot x_4 + 3.88 \cdot x_5 \geq 3.5.$$

наявність в рецептурі моноуглеводів не менше 3 %, але не більше 7 %:

$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 \geq 3;$$
$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 \leq 7.$$

наявність в рецептурі жирів не більше 10 %:

$$9.3 \cdot x_1 + 0.03 \cdot x_4 + 9.74 \cdot x_5 \leq 10.$$

наявність в рецептурі сухих речовин не менше 19 %, але не більше 25 %:

$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 \geq 19;$$
$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 \leq 25.$$

умови нормування (маса суміші 100 г):

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 100$$

верхні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \leq 90; x_2 \leq 3; x_3 \leq 2; x_4 \leq 2; x_5 \leq 3.$$

нижні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \geq 80; x_2 \geq 2; x_3 \geq 1; x_4 \geq 1; x_5 \geq 2.$$

Максимальну харчову цінність проектного продукту з додаванням псиліуму, визначаємо як суму харчової цінності складових частин PI, маса яких складається з рецептура:

$$F(x) = 51.8 \cdot x_1 + 11.8 \cdot x_2 + 0.64 \cdot x_3 + 1.54 \cdot x_4 + 33.3 \cdot x_5 + 92.12 \cdot x_6 \rightarrow \max$$

На підставі інформаційної матриці даних формуємо систему лінійних балансових рівнянь за змістом в рецептурі білків, жирів, моноуглеводів, при дотриманні обмежень:

наявність в рецептурі білку не менше 3.5 %:

$$4 \cdot x_1 + 0.3 \cdot x_2 + 0.2 \cdot x_3 + 0.04 \cdot x_4 + 3.88 \cdot x_5 + 1.5 \cdot x_6 \geq 3.5.$$

наявність в рецептурі моноуглеводів не менше 3 %, але не більше 7 %:

$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 + 1.46 \cdot x_6 \geq 3;$$

$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 + 1.46 \cdot x_6 \leq 7.$$

наявність в рецептурі жирів не більше 10 %:

$$9.3 \cdot x_1 + 0.03 \cdot x_4 + 9.74 \cdot x_5 + 0.6 \cdot x_6 \leq 10.$$

наявність в рецептурі сухих речовин не менше 19 %, але не більше 25 %:

$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 + 88.56 \cdot x_6 \geq 19;$$

$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 + 88.56 \cdot x_6 \leq 25.$$

умови нормування (маса суміші 100 г):

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 100$$

верхні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \leq 90; x_2 \leq 3; x_3 \leq 2; x_4 \leq 2; x_5 \leq 3; x_6 \leq 2.$$

нижні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \geq 80; x_2 \geq 2; x_3 \geq 1; x_4 \geq 1; x_5 \geq 2; x_6 \geq 1.$$

Максимальну харчову цінність проектного продукту з додаванням гідролізату колагену, визначали як суму харчової цінності складових частин PI, маса яких складається з рецептури:

$$F(x) = 51.8 \cdot x_1 + 11.8 \cdot x_2 + 0.64 \cdot x_3 + 1.54 \cdot x_4 + 33.3 \cdot x_5 + 70.75 \cdot x_7 \rightarrow \max$$

На підставі інформаційної матриці даних формували систему лінійних балансових рівнянь за змістом в рецептурі білків, жирів, моноуглеводів, при дотриманні обмежень:

наявність в рецептурі білку не менше 3.5 %:

$$4 \cdot x_1 + 0.3 \cdot x_2 + 0.2 \cdot x_3 + 0.04 \cdot x_4 + 3.88 \cdot x_5 + 70 \cdot x_7 \geq 3.5$$

наявність в рецептурі моноуглеводів не менше 3 %, але не більше 7 %:

$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 \geq 3;$$
$$2.5 \cdot x_1 + 5.4 \cdot x_2 + 0.04 \cdot x_3 + 0.64 \cdot x_4 + 2.44 \cdot x_5 \leq 7.$$

наявність в рецептурі жирів не більше 10 %:

$$9.3 \cdot x_1 + 0.03 \cdot x_4 + 9.74 \cdot x_5 \leq 10.$$

наявність в рецептурі сухих речовин не менше 19 %, але не більше 25 %:

$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 + 0.75 \cdot x_7 \geq 19;$$

$$36 \cdot x_1 + 6.04 \cdot x_2 + 0.4 \cdot x_3 + 0.82 \cdot x_4 + 17.2 \cdot x_5 + 0.75 \cdot x_7 \leq 25.$$

умови нормування (маса суміші 100 г):

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 = 100$$

верхні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \leq 90; x_2 \leq 3; x_3 \leq 2; x_4 \leq 2; x_5 \leq 3; x_7 \leq 2.$$

нижні обмеження змінних (PI):

$$x_1 \geq 80; x_2 \geq 2; x_3 \geq 1; x_4 \geq 1; x_5 \geq 2; x_7 \geq 1.$$

В результаті застосування лінійного програмування виконуємо оптимальне рішення: знаходимо екстремум лінійної цільової функції при обмеженнях на змінні, що необхідно знайти. Рішення системи лінійних балансових рівнянь проводили за допомогою «Пошуку рішення» в програмі EXCEL.

В результаті розрахунку програми отримали частки рецептурних компонентів для соусу «Дієтичний»:

$$x_1 = 86.7; x_2 = 2.3; x_3 = 1.62; x_4 = 1.83; x_5 = 2.58.$$

при цьому $F(x) = 4707.97 \rightarrow \max$
Для соусу «Дієтичний + псиліум»:

$$x_1 = 86.7; x_2 = 2.3; x_3 = 1.62; x_4 = 1.83; x_5 = 2.58; x_6 = 1.73.$$

при цьому $F(x) = 4767.34 \rightarrow \max$
Для соусу «Дієтичний + гідролізат колагену»:

$$x_1 = 86.7; x_2 = 2.3; x_3 = 1.62; x_4 = 1.83; x_5 = 2.58; x_7 = 1.71.$$

при цьому $F(x) = 4727.67 \rightarrow \max$

Відповідно до отриманих результатів склали рецептури соусів «Дієтичний» (табл. 4), «Дієтичний + псиліум» (табл. 5) та «Дієтичний + гідролізат колагену» (табл. 6).

За отриманими рецептурами було вироблено партію соусів та проведено їх дегустаційну оцінку. Оцінку сенсорних показників отриманих продуктів наведено в табл. 7. Органолептичну оцінку проводили сенсорним методом за показниками, передбаченими стандартом ДСТУ 2781-98: зовнішній вигляд, консистенція, колір, запах, смак. Органолептичну оцінку проводила дегустаційна комісія, в склад якої входив викладацько-студентський склад кафедри Технології ресторанного і оздоровчого харчування загалом 10 осіб.

Наступним етапом дослідження було проведення дослідження нутрієнтного складу розроблених соусів.

Результати, представлені в таблиці 8 свідчать, що розроблені продукти мають високий вміст білкових речовин, що є досить важливо з точки зору забезпечення потреб організму сучасної людини.

Таблиця 4 – Рецептатура соусу «Дієтичний» на 100 грам продукту

Сировина	Рецептура, г	Втрати		Норма використання, г
		%	г	
Йогурт	86.7	1,5	1.3	88
Кінза	2.3	1.1	0.025	2.33
Пластівці чілі	1.62	1	0.016	1.64
Лимонний сік	1.83	1	0.02	1.85
Кунжут	2.58	1	0.026	2.6

Таблиця 5 – Рецептатура соусу «Дієтичний + псиліум» на 100 грам продукту

Сировина	Рецептура, г	Втрати		Норма використання, г
		%	г	
Йогурт	86.7	1,5	1.3	88
Кінза	2.3	1.1	0.025	2.33
Пластівці чілі	1.62	1	0.016	1.64
Лимонний сік	1.83	1	0.02	1.85
Кунжут	2.58	1	0.026	2.6
Псиліум	1.73	1	0.017	1.75

Таблиця 6 – Рецептатура соусу «Дієтичний + гідролізат колагену» на 100 грам продукту

Сировина	Рецептура, г	Втрати		Норма використання, г
		%	г	
Йогурт	86.7	1,5	1.3	88
Кінза	2.3	1.1	0.025	2.33
Пластівці чілі	1.62	1	0.016	1.64
Лимонний сік	1.83	1	0.02	1.85
Кунжут	2.58	1	0.026	2.6
Гідролізат колагену	1.71	1	0.017	1.73

Таблиця 7 – Сенсорні показники розроблених соусів

Назва показника	соус «Дієтичний»	соус «Дієтичний + псиліум»	соус «Дієтичний + гідролізат колагену»
Зовнішній вигляд	Форма правильна, поверхня гладка, без деформацій і розшарування, продукт має привабливий вигляд	Форма правильна, поверхня гладка, без деформацій і розшарування, продукт має привабливий вигляд	Форма правильна, поверхня майже ідеально гладка, з невеликими згустками, без деформацій і розшарування, продукт має привабливий вигляд
Структура	Однорідна, рівномірна та ніжна		
Консистенція	Часточки рослинної сировини рівномірно розподілені по всьому об'єму (вкраплення)		
Смак	Молочний, без сторонніх присмаків		
Запах	Чистий, молочний, без сторонніх запахів. Приємний, яскраво виражений		
Колір	Світло-білий з червоними та зеленими вкрапленнями	Білий з червоними та зеленими вкрапленнями	Білий з червоними та зеленими вкрапленнями

Таблиця 8 – Макронутрієнтний склад соусів (г/100 г)

Назва макронутрієнта	Соус «Дієтичний»	Соус «Дієтичний + псиліум»	Соус «Дієтичний + Гідролізат
Вода	75.4	90.4	81.4
Білок	6.68	8.18	76.68
Жир	2.7	3.3	2.7
Вуглеводи	60.24	61.7	60.24
Зола	0.57	0.57	0.57

Слід відзначити, що розроблені продукти відрізняються досить високим вмістом всіх основних, необхідних для організму людини мікронутрієнтів, а саме кальцію, магнію, фосфору та калію (табл. 9).

Таблиця 9 – Вміст основних мікронутрієнтів та ступінь задоволення добової потреби людини, % (при споживанні 100 г соусу)

Мікронутрієнти	Добова потреба, мг	«Дієтичний»		«Дієтичний + псиліум»		«Дієтичний + Гідролізат колагену»	
		Вміст, мг	Задоволеність від добової потреби, %	Вміст, мг	Задоволеність від добової потреби, %	Вміст, мг	Задоволеність від добової потреби, %
Кальцій (Ca)	3000	112.9	3.8	112.9	3.8	112.9	3.8
Магній (Mg)	800	14	1.7	14	1.7	14	1.7
Фосфор (P)	400	89.1	22.3	89.1	22.3	89.1	22.3
Калій (K)	2500	143.1	5.7	143.1	5.7	143.1	5.7
Натрій (Na)	400	46.9	11.7	46.9	11.7	46.9	11.7
Залізо (Fe)	18	0.1	0.6	0.1	0.6	0.1	0.6
A	0.1	0.03	29.00	0.03	29.00	0.03	29.00
B1	1.5	0.04	2.66	0.04	2.66	0.04	2.66
B2	1.8	0.2	10.37	0.2	10.37	0.2	10.37
B6	0.2	0.01	7.25	0.01	7.25	0.01	7.25
C	80	4.9	6.16	4.9	6.16	4.9	6.16
PP	20	0.2	1.21	0.2	1.21	0.2	1.21
E	15	0.2	1.22	0.2	1.22	0.2	1.22

Оскільки готовий продукт містять білок, необхідним стало проведення аналізу амінокислотного складу. Результати досліджень показали, що в білковій складовій містяться дев'ятнадцять амінокислот, в тому числі всі незамінні рис. 1.

Дослідження біологічної цінності соусу вивчали за розрахунком амінокислотного скору, що наведено на рис. 2.

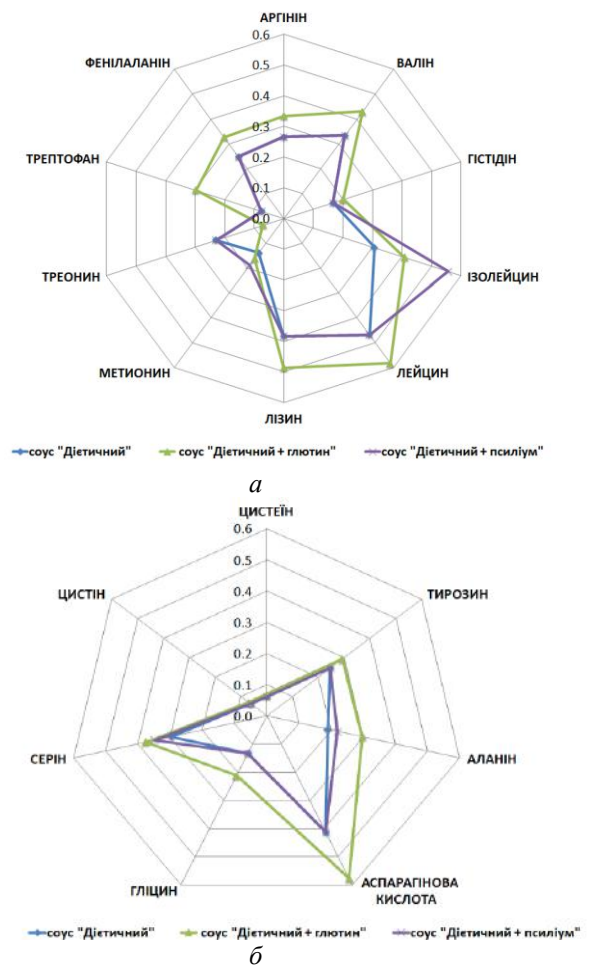


Рис. 1 – Вміст амінокислот у готовому продукті, г/100 г: а – вміст незамінних амінокислот; б – вміст замінних амінокислот

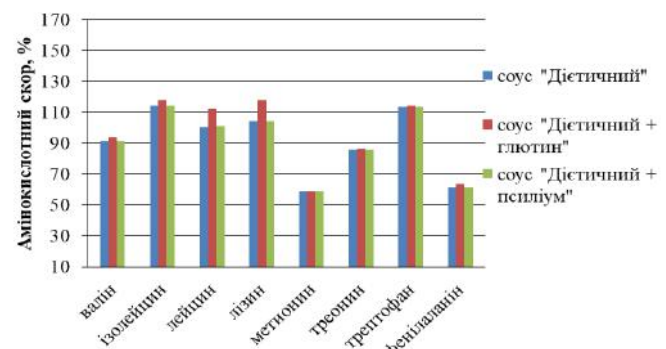


Рис. 2 – Амінокислотний скор розробленого соусу

Одним з найважливіших показників якості готової продукції харчування є показник мікробіологічної безпеки, оскільки він нерозривно пов'язаний зі здоров'ям споживачів. Нехтування перевіркою мікробіологічних показників тягне за собою істотну шкоду не тільки для здоров'я людей, а й значні економічні збитки для країни виробника. Мікроорганізми, які стають збудниками харчових

отруєнь зазвичай не викликають органолептичних змін продукту і тому продукти потребують перевірки.

Дослідження зміни мікробіологічної біомаси в десерті в процесі зберігання представлені в табл. 10, 11, 12. Зберігання десерту проводили в закритій тарі при температурі $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Таблиця 10 – Мікробіологічні показники якості соусу «Дієтичний»

Найменування показників	Зберігання, доба			
	1	2	3	4
Бактерії кишкової палички коліформи, КУО в 0,01 г продукту	Не виявлено			
Патогенні мікроорганізми, Salmonella, в 25 г продукту	Не виявлено			
Кількість плісневих грибів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,3 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^2$
Кількість дріжджів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,4 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^1$	$2,9 \cdot 10^1$	$3,1 \cdot 10^1$
Staphylococcus aureus, в 0,01 г продукту	Не виявлено			

Таблиця 11 – Мікробіологічні показники якості соусу «Дієтичний + псиліум»

Найменування показників	Зберігання, доба			
	1	2	3	4
Бактерії кишкової палички коліформи, КУО в 0,01 г продукту	Не виявлено			
Патогенні мікроорганізми, Salmonella, в 25 г продукту	Не виявлено			
Кількість плісневих грибів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,3 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$
Кількість дріжджів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,4 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^1$	$2,8 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$
Staphylococcus aureus, в 0,01 г продукту	Не виявлено			

Таблиця 12 – Мікробіологічні показники якості соусу «Дієтичний + гідролізат колагену»

Найменування показників	Зберігання, доба			
	1	2	3	4
Бактерії кишкової палички коліформи, КУО в 0,01 г продукту	Не виявлено			
Патогенні мікроорганізми, Salmonella, в 25 г продукту	Не виявлено			
Кількість плісневих грибів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,3 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$
Кількість дріжджів, КУО в 1 г продукту, не більше	$2,4 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^1$	$2,9 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$
Staphylococcus aureus, в 0,01 г продукту	Не виявлено			

Органолептична оцінка розроблених соусів (рисунок 3) в процесі зберігання показала, що по всіх аналізованих показниках протягом 4 днів зберігання продукти зберігають відносно високі органолептичні показники.

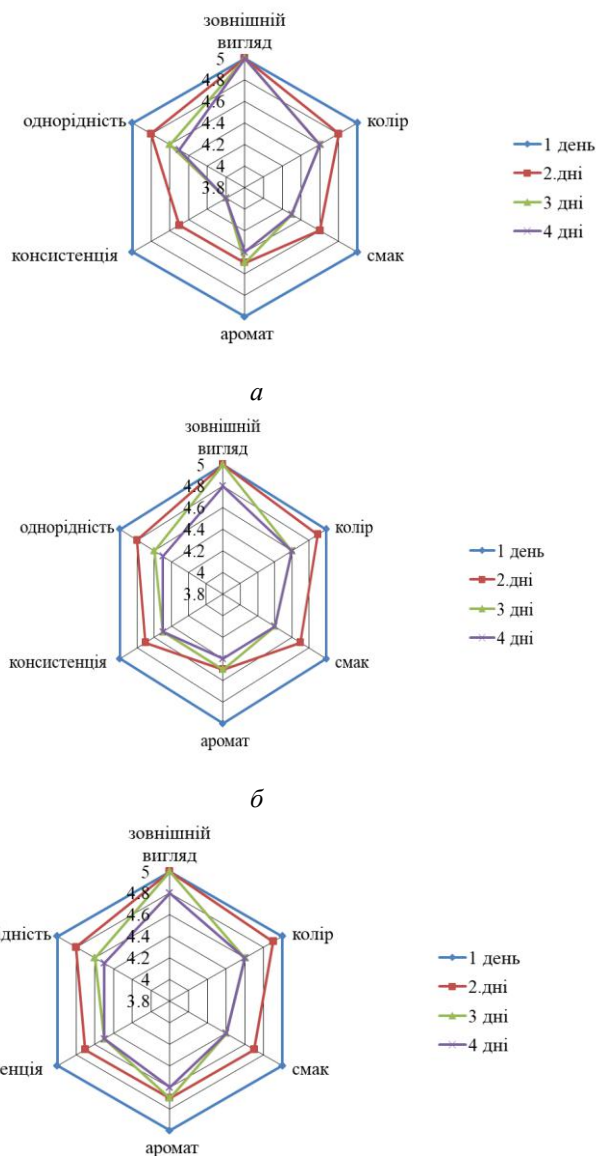


Рис. 3 – Динаміка зміни органолептичних показників в процесі зберігання соусів: а – соус «Дієтичний»; б – соус «Дієтичний + псиліум»; в – соус «Дієтичний + Гідролізат колагену00ВВ

Для прогнозування зміни якості розроблених продуктів в зберіганні провели дослідження зміни сенсорних показників за методом ALST. Зберігали отримані продукти в наступних умовах. Динаміка зміни органолептичних показників в бальної системі наведено на рис. 1. Інтервали змін значень органолептичних показників призначали рівним від 0 до 5 балів: 0–1 – дуже погана якість, 1–2 – погана

якість; 2–3 – середня якість; 3–4 – гарна якість; 4–5 – відмінна якість.

Органолептична оцінка розробленого соусів в процесі зберігання показала, що по всіх аналізованих показниках протягом 4 днів зберігання продукт зберігає відносно високі органолептичні показники в скляній тарі. Але зберігання в пластиковій тарі відрізняється більш значним погіршенням органолептичних якостей.

Таким чином, на підставі зроблених досліджень можна рекомендувати термін зберігання – 4 дні при температурі (4 ± 2)°C у скляній тарі.

Обговорення результатів визначення показників якості соусів

Дослідження складу мікронутрієнтів показало, що споживання 100 г соусу «Дієтичний» задовольняє потреби людини в вітамінах А та В2 на 29 та 10.37 % відповідно.

Отримані дані дослідження якісних показників показали, що при зберіганні протягом 4 днів при температурі (12 ± 5)°C вологістю 70–75 % в скляній та пластиковій тарі, вміст санітарно-показових мікроорганізмів відповідає санітарно-гігієнічним вимогам до соусів.

Розроблені продукти мають високий вміст білкових речовин, що є досить важливо з точки зору забезпечення потреб організму сучасної людини.

Результати, дозволяють встановити, що при тривалому зберіганні товарних зразків соусів з включенням рослинних добавок в різних умовах у міру подовження терміну зберігання знижується число бактерій. Абсолютна кількість спороутворюючих бактерій в досліджуваних зразках, що зберігалися в синтетичній упаковці, залишалося на одному рівні, а відносний вміст їх у сумарній бактеріальній флорі підвищувався.

Розроблена композиція може бути реалізована у виробничих умовах підприємств ресторанного господарства.

Висновки

Розроблено рецептури соусів на основі йогурту. Проведено оптимізацію рецептур за допомогою табличного процесору Solver (MS Excel 2010), встановлено оптимальний вміст всіх складових. Що дало можливість отримати вироби збалансовані за біологічною цінністю та покращеними споживними властивостями.

Досліджено хімічний склад розроблених соусів. Доведено збалансованість за вмістом основних нутрієнтів. Встановлено, що вміст білка в розроблених соусах «Дієтичний», «Дієтичний + псиліум» та «Дієтичний + Гідролізат колагену» становить 8.42, 10.02 та 78.42 г/100 г відповідно. Вміст вуглеводів розроблених продуктів становить 60.27, 61.73 та 60.27 г/100 г «Дієтичний», «Дієтичний

+ псиліум» та «Дієтичний + Гідролізат колагену» відповідно. Споживання 100 г розроблених соусів забезпечить організм незамінними амінокислотами. Розроблені соуси «Дієтичний», «Дієтичний + псиліум» та «Дієтичний + Гідролізат колагену» задовільняють потребу людини у вітаміні А на 29 % відповідно, а потребу Фосфору (Р) на 22%.

На основі проведених мікробіологічних досліджень встановлено, що при зберіганні розроблених соусів в нерегульованих умовах, дані продукти мають досить непогані кількісні та якісні показники. Рекомендований термін зберігання 4 доби при температурі повітря (12 ± 2)° та відносній вологості не більше 75 %.

Досліджено плинність соусів. Доведено, що оптимальною температурою для подачі соусу на підприємствах ресторанного господарства є температура 30 °C.

Список літератури

1. **Тележенко, Л. М.** Моделювання раціонального харчування / **Л. М. Тележенко, Н. А. Кушнір, М. М. Годорова** // *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр./ Голов. ред. О.О. Шубін / Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського.* – Донецьк. – 2013. – Вип. 30. – С. 306-311.
2. **Шарабчиев, Т. В.** Общественное здоровье нации и индивидуальное здоровье личности / **Т. В. Шарабчиев** // *Медицинские новости.* – 2015. – № 3. – С. 18-25.
3. Технологія продуктів харчування функціонального призначення: монографія / **М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко, Д. В. Федорова та ін.** – К.: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2008. – 718 с.
4. Здорове харчування: практичні рекомендації: монографія / **Л. М. Тележенко, Н. А. Дзюба, М. А. Кашкано.** – Херсон: Олді-плюс, 2018. – 200 с.
5. **Цимбаліста, Н. В.** Стан фактичного харчування населення та аліментарно обумовлена захворюваність / **Н. В. Цимбаліста, Н. В. Давиденко** // *Проблеми харчування.* – 2008. – № 1-2. – С. 32-35.
6. **Спиричев, В. Б.** Витамины, вигаминоподобные и минеральные вещества: справочник / **В. Б. Спиричев.** – М.: МЦФЗР, 2004. – 230 с.
7. **Brownstein, M. J.** Functional Genomics / **M. J. Brownstein, A. K. Rhodursky** // *Human Press. Totowa.* – 2003. – P. 272.
8. **Jose, C. Clemente.** The Impact of the Gut Microbiota on Human Health: An Integrative View / **Jose C. Clemente, Luke K. Ursell, RobKnight** // *Cell.* – 2012. – V. 148, I. 6. – P. 1258-1270. – doi: 10.1016/j.cell.2012.01.035.
9. **Пересічний, М. І.** Технологія та якість борошняних кондитерських виробів для харчування хворих на цукровий діабет / **М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко, Д. В. Федорова** // *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. ДонНУЕТ.* – Донецьк, 2003. – Вип. 9 – С. 228-233.
10. **Roberfroid, M.** Functional Food to Functional Food Science / **M. Roberfroid** // *Abstr. of Lectures and Posters of 9 World Congr. Of Food Science and Technology.* – Budapest, 1995. – Vol. 1 – p. 16.
11. **Fredert, K.** New insights into food and health / **K. Fredert** // *Food technology.* – 2010. – № 5. – p. 44-49.

12. **Nepovinnikh, N. V.** Hydrogel based dessert of low calorie content / **N. V. Nepovinnikha, O. N. Kliukinaa, N. M. Ptichkinaa, A. Bostanb** // *Food Hydrocolloids*. – 2019. – V. 86. – P. 184-192. – doi:10.1016/j.foodhyd.2018.03.036.
13. **Ка, М. Ng.** Chemical product design: Advances in and proposed directions for research and teaching / **M. Ng Ka, Rafiqul Gani** // *Computers & Chemical Engineering*. – 2019. – V. 126. – P. 147-156. doi:10.1016/j.compchemeng.2019.04.008.
14. **Qilei, Liu.** OptCAMD: An optimization-based framework and tool for molecular and mixture product design / **Qilei Liu, Lei Zhang, Linlin Liu, Jian Du, Anjan Kumar Tula, Mario Eden, Rafiqul Gani** // *Computers & Chemical Engineering*. – 2019. – V. 124. – P. 285-3018. – doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.01.006.
15. **Pavlyuk, R.** Development of the nanotechnology for wellness products “Naturesuperfood” fruit and vegetable icecream sorbets with a record content of biologically active substances / **R. Pavlyuk, V. Pogarskaya, A. Pogarskiy, I. Kakadii, T. Stukonozhenko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 6. – № 11 (96). – P. 59-68. – doi: 10.15587/1729-4061.2018.148071.
16. Харчові добавки / **О. Ф. Аксьонова, та ін.**; під ред. О.І. Упатова. – ДОД ХДУХТ, 2011. – 59 с.
17. **Abdellatif, D.** Chemical and physicochemical characterizations of the water-soluble fraction of the *Commiphora Africana* exudate / **D. Abdellatif, Bah Mohamed-Lemine Abdellahi, Mohamed Fadel Deida, Nicolas Hucher, Catherine Malhiac, Frédéric Renou** // *Food Hydrocolloids*. – 2019. – V. 86. – P. 2-10. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.032.
18. **Dzyuba, N.** Determining biological value and quality indicators of beverages of the drink-breakfast type / **N. Dzyuba, L. Telezhenko, I. Kalugina, Y. Kozonova, M. Serdyuk, O. Danchenko, E. Sukharenko, L. Zdorovtseva, V. Hidzhelitskiy** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 1. – № 11 (91). – P. 33-39. – doi: 10.15587/1729-4061.2018.147804.
19. **Dzyuba, N.** Study into collagen hydrolyzate applicability as a structure forming agent / **N. Dzyuba, I. Bilenka, A. Palvashova, E. Zemlyakova** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 5. – № 11 (89). – P. 10-17. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.110498.
20. Пат. 65434 Україна, А 23 L 1/39. Спосіб виробництва сметанного соусу / **Архів В. В., Васюкова Г. Т., Мошкін В. Ф. та ін.**; заявник і патентовласник Нац. ун-т харч. технологій. – № 97063289; заявл. 27.11.03; опубл. 16.05.04.
21. Пат. 122815, МПК А23 L 27/60. Йогуртовий соус / **Шинкарик М. М., Давида В. О., Крупа О. М.**; заявл. 11.08.17; опубл. 25.0.18, Бюл. № 2.
22. Пат. 76057, МПК А 23 L, 1/39. Фруктово-овочевий соус функціонального призначення / **Дяконова А. К., Парамонова А. Ю.**; заявл. 21.05.12; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24.
23. **Monge, A.** Functional foods. Reflexions af scientist regarding a market in expansion / **A. Monge, T. Cardozo, E Barriero at al.** // *Rev. Cenic. Cienc. Quim.* – 2008. – Vol. 39. – №2. – p. 81-93.
24. **O.O. Shubin / Donets nats University of Economics and Trade them. M. Tugan-Baranovsky,** 2013, **30**, 306-311.
25. **Sharabchiev, T. V.** Public health of the nation and individual health of the personality. *Medical News*, 2015, **3**, 18-25.
26. **Average, M. I., Kravchenko, M. F., Fedorov, D. V. et al.** Technology of food products of functional purpose: monogr. Kyiv. nats Trade. Ekonom. Unt., 2008, 718.
27. **Telezhenko, L. M., Dzyuba, N. A., Kashkano, M. A.** Healthy food: practical recommendations: monograph. Kherson: Oldi Plus, 2018. - 200 p.
28. **Zumbalista, N. V., Tsimbalista, N. V., Davidenko, N. V.** The state of the actual nutrition of the population and the alimentary-caused morbidity. *Problems of nutrition*, 2008, **1-2**, 32-35.
29. **Spirichev, V. B.** Vitamins, vygamin-like and mineral substances: reference book. Moscow: ICFZR, 2004, 230.
30. **Brownstein, M. J., Rhodursky, A. K.** Functional Genomics. *Human Press. Totowa*, 2003, 272.
31. **Jose, C. Clemente, Luke, K. Ursell, RobKnight.** The Impact of the Gut Microbiota on Human Health: An Integrative View. *Cell*, 2012, **148**(6), 1258-1270. doi.org/10.1016/j.cell.2012.01.035.
32. **PeresIchniy, M. I., Kravchenko, M. F., Fedorova, D. V.** Tehnologiya ta yaklst boroshnyanih konditerskih virobiv dlya harchuvannya hvorih na tsukroviy dlabet. *Obladnannya ta tehnologiyi harchovih virobnitstv: temat. zb. nauk. pr. DonNUET*, 2003, **9**, 228-233.
33. **Roberfroid, M.** Functional Food to Functional Food Science. *Abstr.of Lectures and Posters of 9 World Congr. Of Food Science and Technology*, Budapest, 1995, **1**, 16.
34. **Fredert, K.** New insights into food and health *Food technology*, 2010, **5**, 44-49.
35. **Nepovinnikh, N. V., Kliukinaa, O. N., Ptichkinaa, N. M., Bostanb, A.** Hydrogel based dessert of low calorie content. *Food Hydrocolloids*, 2019, **86**, 184-192, doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.036.
36. **Ka, M. Ng, Rafiqul, Gani.** Chemical product design: Advances in and proposed directions for research and teaching. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, **126**, 147-156, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.04.008.
37. **Qilei, Liu, Lei, Zhang, Linlin, Liu, Jian, Du, Anjan, Kumar, Tula, Mario, Eden, Rafiqul, Gani.** OptCAMD: An optimization-based framework and tool for molecular and mixture product design. *Computers & Chemical Engineering*, 2019, **124**, 285-3018, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.01.006.
38. **Pavlyuk, R. V. Pogarskaya, A. Pogarskiy, I. Kakadii, T. Stukonozhenko** Development of the nanotechnology for wellness products “Naturesuperfood” fruit and vegetable icecream sorbets with a record content of biologically active substances. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, **6**, **11** (96), 59-68, doi: 10.15587/1729-4061.2018.148071.
39. **Aksonova, O. F. et al** Nutritional supplements / ed. O.I. Upatova. - DOD KHDUGT, 2011, 59.
40. **Abdellatif, D., Bah Mohamed-Lemine, Abdellahi, Mohamed, Fadel Deida, Nicolas, Hucher, Catherine, Malhiac, Frédéric, Renou** Chemical and physicochemical haracterizations of the water-soluble fraction of the *Commiphora Africana* exudate. *Food Hydrocolloids*, 2019, **86**, 2-10, doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.10.032.
41. **Dzyuba, N., Telezhenko, L., Kalugina, I., Kozonova, Y., Serdyuk, M., Danchenko, O., Sukharenko, E., Zdorovtseva, L., Hidzhelitskiy, V.** Determining biological value and quality indicators of beverages of the drink-

References (transliterated)

1. **Telezhenko, L. M., Kushnir, N. A., Todorova, M. M.** Modeling of rational nutrition. *Equipment and technologies of food production: memam. save sciences etc. Heads. edit*

- breakfast type. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 1, **11** (91), 33-39, doi: 10.15587/1729-4061.2018.147804.
19. **Dzyuba, N., Bilenka, I., Palvashova, A., Zemlyakova, E.** Study into collagen hydrolyzate applicability as a structure forming agent. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 5, **11** (89), 10-17, doi: 10.15587/1729-4061.2017.110498.
20. Pat. 65434 Ukraine, A 23 L 1/39. Method of production of sour cream sauce / Archive V.V., Vasyukova G.T., Moshkin V.F., et al.; Applicant and patent holder National. Un-t food, technology. - No. 97063289; stated. 27.11.03; published May 16, 04.
21. Pat. 122815, IPC A23 L 27/60. Yoghurt sauce / Shinkarik M.M., David V.O., Krupa O.M.; stated. 11.08.17; published 25.0.18, Bull. No. 2.
22. Pat. 76057, IPC A 23 L, 1/39. Fruit and vegetable sauce of functional purpose / Diakonova A. K., Paramonova A.Yu.; stated. May 21, 12; published Dec 25, 12, Bull. No. 24.
23. **Monge, A., Cardozo, T., Barriero, E. et al.** Functional foods. Reflexions of scientist regarding a market in expansion. *Rev. Cenic. Cienc. Quim*, 2008, 39, **2**, 81-93.

Сведения об авторах (About authors)

Дзюба Надія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри Технології ресторанного і оздоровчого харчування; м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6609-3965>; e-mail: dzyubanadya282@gmail.com.

Nadya Dzyuba – Scientific Degree (Ph. D.), Docent Department Technologies of restaurant and health nutrition, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6609-3965>; e-mail: dzyubanadya282@gmail.com.

Сіроцінська Дарія Анатоліївна – шеф-кухар ресторану «Urban Space 100», м. Івано-Франківськ, Україна, e-mail: dvaluieva1@gmail.com.

Daria Sirotsinska – Chef of the restaurant "Urban Space 100", Ivano-Frankivsk, Ukraine, e-mail: dvaluieva1@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Дзюба, Н. А. Проектування полікомпонентних соусів дієтичної спрямованості / **Н. А. Дзюба, Д. А. Сіроцінська** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 75-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.09.

Please cite this article as:

Dzyuba, N., Sirotsinska, D. Designing of multicomponent sauces of dietary orientations. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **1**, 75-85, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.09.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Дзюба, Н. А. Проектирование поликомпонентных соусов диетического направления / **Н. А. Дзюба, Д. А. Сіроцінська** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 75-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.09.

АННОТАЦИЯ Одними из основных направлений в области проектирования пищевых продуктов являются: разработка рецептур и технологий продуктов массового потребления; функциональных и специализированных пищевых продуктов, в том числе обогащенных эссенциальными микронутриентами; моделирование рецептурных смесей различных групп готовых продуктов с учетом объемов их потребления, особенностей технологии производства, обеспечивающие сохранение внесенных и эндогенных нутриентов. При разработке композиционного состава соусов было уделено значительное внимание нутриентному составу сырья, его изменению при технологической обработке и сбалансированности. Разработанные рецептуры поликомпонентных соусов на основе йогурта, кинзы, перца чили и кунжута. Определены физико-химические показатели полученных соусов, проведен анализ таких показателей как аминокислотный скор и содержание микронутриентов. Разработанные продукты отличаются достаточно высоким содержанием всех основных, необходимых для организма человека микронутриентов, а именно кальция, магния, фосфора и калия. Исследование состава микронутриентов показало, что потребление 100 г соуса «Диетический» удовлетворяет потребности человека в витаминах А и В₂ на 29 и 10.37% соответственно. Моделирование условий хранения с помощью ALST теста по оценке изменения микробиологических и органолептических показателей дает возможность утверждать, что соусы будут конкурентоспособными на потребительском рынке Украины. Полученные данные исследования качественных показателей показали, что при хранении в течение 4 дней при температуре (12 ± 5) °С влажностью 70-75% в стеклянной и пластиковой таре, содержание санитарно-показательных микроорганизмов соответствует санитарно-гигиеническим требованиям к соусам. Разработанные продукты имеют высокое содержание белковых веществ, что достаточно важно с точки зрения обеспечения потребностей организма современного человека. Разработанные соусы могут быть рекомендованы для применения подростками, детьми, диетическом питании, и потребление других слоев населения.

Ключевые слова: математическое моделирование; показатели качества; соус; гидролизат коллагена; сбалансированный нутриентный состав; сенсорные показатели

Поступила (received) 22.08.2019

УДК 637.247.044-021.146.4:664.84-0.21.465

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.10

ОДЕРЖАННЯ СУХОГО БЕЗЛАКТОЗНОГО БІЛКОВО-ЛІПІДНОГО КОНЦЕНТРАТУ МАСЛЯНКИ**А. А. ТРУБНІКОВА^{*1}, О. Б. ЧАБАНОВА¹, С. М. БОНДАР², Т. Є. ШАРАХМАТОВА¹**¹ кафедра технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики, ОНАХТ, м. Одеса, УКРАЇНА² кафедра екології та природоохоронних технологій, ОНАХТ, м. Одеса, УКРАЇНА^{*}e-mail: sc228004@ukr.net

АНОТАЦІЯ Комплексна переробка маслянки в безлактозні білкові концентрати, що призначені для подальшого промислового перероблення, в якості білкових збагачувачів або білкової основи у виробництві харчових продуктів, є актуальним. Безлактозний білково-ліпідний концентрат маслянки отримували мембранними методами та висушували у завислому шарі інертних носіїв. В роботі наведена технологічна схема отримання сухого безлактозного-білково-ліпідного концентрату маслянки. Визначений раціональний режим сушіння рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату у сушарці фонтануючого шару із інертними носіями: температура повітря на вході 125-130 °С; температура продукту на виході з сушарки – 55-60 °С; швидкість повітря у входному перетині – 15-20 м/с; масова частка сухих речовин у входному концентраті – не більше 20%; кінцева вологість сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки – не більше 5,0%; інертний носій – фторопласт у формі кубиків з розмірами грані 5 мм; спосіб подачі розчину у сушильну камеру – знизу у фонтануючий шар інертного носія. Визначені органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники отриманого сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки. Сухі безлактозні білково-ліпідні концентрати маслянки з високим вмістом білка (81,03-81,819%) забезпечують поліпшення білкової складової без додавання лактози до харчових продуктів (масова частка лактози не більше 0,064%). Загальна кількість фосфоліпідів в одержаному сухому концентраті маслянки складає 2687 мг%, що виявляють високі біологічно-активні властивості. З додаванням сухих безлактозних білково-ліпідних концентратів до рецептури додатково вносяться цінні мінерали, такі як кальцій, магній і фосфор, що може зменшити потребу в додаткових джерелах цих мінералів. Визначення наявності бактерій групи кишкових паличок у 1,0 см³ зразку сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки свідчить про їх відсутність у дослідженому об'ємі, що доводить правильність всіх режимів основних технологічних процесів. За мікробіологічними показниками отриманий концентрат відповідає вимогам науково-технічної документації.

Ключові слова: безлактозний білково-ліпідний концентрат маслянки; сушіння; технологія; показники якості

PREPARATION OF DRY LACTOSE PROTEIN-LIPID CONCENTRATE OF BUTTERMILK**A. TRUBNIKOVA¹, O. CHABANOVA¹, S. BONDAR², T. SHARAKHMATOVA¹**¹ Department of technology of milk, oil-fat products and cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE² Department of Ecology and Environmental Technologies cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT Complex processing of buttermilk in lactose protein concentrates is relevant. Free-lactose protein-lipid concentrates are intended for further industrial processing. They can be used as protein enrichment or protein basis in the production of food products. In the work the technological scheme of obtaining a dry free-lactose protein-lipid concentrate of buttermilk. The non-lactic protein-lipid concentrate was received by membrane methods and dried in the dryer of the fountain layer of inert carriers. The rational mode of drying of a liquid free-lactose protein-lipid concentrate in the dryer of the fountain layer with inert carriers is determined: the temperature of the air at the inlet is 125-130 °C; product temperature at the outlet – 55-60 °C; air velocity at the inlet – 15-20 m/s; mass fraction of dry substances in the inlet concentrate - not more than 20%; the final moisture content of the dry free-lactose protein-lipid concentrate of the buttermilk is 5.0%; inert carrier - fluoroplast in the form of cubes with the dimensions of the face 5 mm; the way of feeding the solution to the drying chamber - from below to the hanging layer of an inert carrier. The organoleptic, physico-chemical and microbiological parameters of the obtained dry free-lactose protein-lipid concentrate of the buttermilk were determined. Dry free-lactose protein-lipid concentrates of high protein content (81.03-81.81%) provide an improvement in the protein without the addition of lactose to food products (mass fraction of lactose not more than 0.064%). When adding dry free-lactose protein-lipid concentrates to the formulation additionally added valuable minerals such as calcium, magnesium and phosphorus, which reduces the need for additional sources of these minerals. Determination of the bacteria of the group of intestinal sticks in 1.0 cm³ of a sample of dry free-lactose protein-lipid concentrate of the buttermilk indicates their absence in the investigated volume, which proves the correctness of all regimes of the main technological processes. According to microbiological data, the concentrate obtained meets the requirements of scientific and technical documentation.

Keywords: lactose-free protein-lipid concentrate; drying; technology; quality indices

Вступ

Комплексна переробка вторинної молочної сировини є необхідним заходом вирішення екологічних проблем, резервом підвищення

ефективності використання сировинних ресурсів, підвищення економічних показників основного виробництва за рахунок збільшення випуску продуктів на основі молочно-білкових концентратів (МБК), які характеризуються підвищеною масовою

часткою білкових речовин та мають добрі технологічні властивості [1].

Молочно-білковий концентрат (МБК) – сухий порошок, який представляє собою білковий комплекс, що містить казеїн і сироваткові білки. Може бути отриманий шляхом осадження білків молока, змішуванням молочних продуктів (наприклад, СЗМ і казеїну) або способом ультрафільтрації знежиреного молока. Основне їх призначення – збагачення продуктів харчування повноцінними білками, поліпшення амінокислотного складу і підвищення біологічної цінності їжі. Однак деякі з молочно-білкових концентратів в процесі виготовлення набувають нових властивостей (підвищується розчинність молочних білків у водних розчинах, вони набувають вологозв'язуючої і емульгуючої здатності, що істотно розширює сферу їх застосування), що відіграє чималу роль для поліпшення якості продукції, що випускається [2,3].

Через постійне збільшення людей, які інтолерантні до лактози, виробництво безлактозних молочно-білкових концентратів, що призначені для подальшого промислового перероблення в якості білкових збагачувачів або білкової основи у виробництві харчових продуктів, є актуальним завданням.

Мета роботи

Мета роботи – одержання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

– отримати рідкий безлактозний білково-ліпідний концентрат маслянки мембранними методами;

– дослідити процес сушіння рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки у зваженому шарі інертних носіїв;

– навести технологічну схему виробництва сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки;

– дослідити показники якості отриманого сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Концентрати молочних білків та ізоляти є новою категорією сухих молочних інгредієнтів, які швидко набирають популярність. Ці продукти виготовляються шляхом концентрування молочних білків (сироваткових білків і казеїнів) з молока шляхом мембранної обробки, а потім сушіння розпиленням. Порошки з вмістом білка нижче 90 називаються концентратами молочних білків, а ті, що мають вміст білка $\geq 90\%$, відомі як білкові ізоляти [4].

Концентрат молочного білка – термін, що використовується для визначення інгредієнта, виготовленого з знежиреного молока, в якому основні фракції білків (казеїн і білок сироватки) були

сконцентровані в процесі мембранної фільтрації. Існує велика різноманітність використовуваних термінів у літературі, що стосується цих продуктів; «ретентатні порошки», «нативний молочний білковий концентрат», «ультрафільтраційний молочний білковий концентрат», «молочний порошок з ультрафільтрованого знежиреного молока», «знежирений порошок ретента молока», і «високобілковий молочний порошок без лактози». Казеїн у цих продуктах є схожим, міцелярним, в той час як білки молочної сироватки знаходяться в їх рідкій формі. Продукти мають відносно високий вміст золи і кальцію, оскільки мінерали, пов'язані з білками, такі як міцелярний фосфат кальцію, зберігаються [4,5].

Концентрати молочних білків та ізоляти також є сухими молочними білковими концентратами, які значно відрізняються від сухого знежиреного молока і сухого незбираного молока за складом і фізико-хімічними і функціональними властивостями. Так, сухі молочні білкові концентрати мають значно низький вміст лактози і мінералів у порівнянні з сухим знежиреним молоком і сухим незбираним молоком завдяки процесам ультрафільтрації та діафільтрації. На відміну від сухого незбираного молока, співвідношення казеїну та сироваткових білків у сухих молочних білкових концентратах ідентичне нативному молоку. Оскільки вміст білка в цих порошках вище, ніж у сухому знежиреному молоці, вони мають кращі функціональні властивості. Основні функціональні властивості харчових білків включають розчинність, емульгування, гелеутворення і спінювання, зв'язування з водою і термостабільність [4].

Стандарти ідентифікації молочних білкових концентратів досі не існують у харчовій промисловості в усьому світі [6].

Молочні білкові концентрати були класифіковані як молочні інгредієнти другого покоління [7,8], що містять білок від 40 до 89% в перерахунок на сухі речовини.

Автори [9] класифікували сухі молочні білкові концентрати на 3 основні типи: (а) порошок з низьким вмістом білка ($\leq 40\%$ вмісту білка), (б) порошок із середнім вмістом білка (60–70% вмісту білка), і (в) високобілковий порошок ($\geq 80\%$ вмісту білка). Таким чином, вміст білка будь-якого концентрату молочних білків (КМБ) може становити від ≥ 40 до $\leq 89\%$. Вміст білка в КМБ обернено пропорційний вмісту лактози і мінералів (золи), іншими словами білок очищається шляхом зменшення вмісту лактози і мінеральних солей. Як молочні білкові інгредієнти, КМБ використовуються в різних продуктах, таких як сир, молочні продукти, харчові продукти, молочні суміші, морозиво, молочні напої, спортивні напої та медичні продукти [10-14].

Сухі молочні білкові концентрати швидко набувають популярності у всьому світі. Випуск на ринок близько 900 різних продуктів (з високим

вмістом білка і низьким вмістом лактози, спеціальних продуктів харчування, спортивних напоїв, енергетичних і дієтичних батончиків та інших), що використовують КМБ в якості ключового інгредієнта, свідчить про їхню популярність [15].

Відповідно до технічного звіту Ради з експорту молока США та Інституту молочної промисловості, сухі молочні білкові концентрати розглядаються як концентровані та потужні джерела якісних білків для підвищення функціональних, харчових та сенсорних властивостей різних харчових продуктів. За даними авторів [12], ринок білкових інгредієнтів з високим вмістом білка, який раніше займали казеїн, казеїнати тощо, в даний час переважають сухі молочні білкові концентрати завдяки їх встановленим харчовим і функціональним властивостям. Нині Нова Зеландія є провідним виробником і експортером сухих молочних білкових концентратів у світі, за якими йде ЄС. Наприклад, виробництво КМБ в усьому світі зросло з 40000 тон у 2000 році до близько 270 тис. тон у 2014 року. Згідно прогнозу виробництво КМБ зросте більш ніж на 40 тис. тон до 2020 року, і це може збільшити обсяг ринку шляхом витіснення казеїну [16].

У нашій країні і за кордоном проведено значну кількість досліджень з розробки технології отримання молочного білка у вологому і сухому виді, гель-формі, гранулах, які знаходять застосування в якості збагачувачів харчових продуктів і компонента повноцінних кормових сумішей. Проблематичним є отримання розчинних форм копреципітату. Методи виділення, концентрування та технологічної обробки білків молочної сировини поділяють на методи виділення основного білку – казеїну (кислотний, сичужний, сичужно-кислотний, фільтрацією) і комплексного виділення казеїну та сироваткових білків (термокальцієвий і термокислотний). Вибір способу коагуляції визначається у відповідності зі способом одержання конкретного молочно-білкового концентрату [17].

Відомий процес фракціонування компонентів молочної сировини полісахаридами з утворенням молочно-білкових концентратів з певним складом і функціональними властивостями. Недоліком цього процесу є його тривалість, висока вартість вихідної сировини та відсутність конкретного застосування концентрату [18].

Авторами [19] запропоновано технологію виробництва молочно-білкових копреципітатів із сколотин з використанням як коагулянтів пюре із ягід журавлини та калини. Досліджено хімічний склад і білкову складову копреципітатів і доведено їхню високу харчову та біологічну цінність.

Поєднання мембранних методів обробки молочної сировини (ультра, діалізація і електродіаліз) відкриває нові можливості в області отримання молочно-білкових концентратів з необхідними властивостями, вуглеводним і мінеральним складом. Так, при схемі: ультрафільтраційне концентрування сироватки -

діалізація - електродіаліз можна виробляти концентрати, що містять 90 - 95% і більше білків молочної сироватки з мінімальним вмістом лактози (0,5%) і мінеральних речовин (<0,3%). Застосування мембранних методів дозволяє виділяти сироваткові білки практично у нативному вигляді без використання хімічних реагентів і інших допоміжних дорогих матеріалів [4,5].

Можна виробляти цілий ряд сухих молочних білкових концентратів з різним вмістом білка, лактози та мінеральних речовин. Ступінь концентрації і умови процесу, що використовуються при мембранній обробці, диктує склад кінцевого сухого продукту.

Сухі молочні білкові концентрати зазвичай готують ультрафільтрацією (УФ), діалізацією (ДФ) до приблизно 21% загального білка та менше 0,5% лактози з подальшим необов'язковим випаровуванням ретентату або концентрату знежиреного молока перед розпилювальним сушінням до вологості менш ніж 5%. Молочні білкові концентрати мають відносно більше неденатурованих білків, оскільки ці процеси не передбачають серйозної термічної обробки і регулювання рН. Більш висока стабільність і хороша розчинність є передумовами для багатьох функціональних властивостей сухих високобілкових концентратів [20].

Технологічні фактори, які впливають на якість КМБ: якість сирого молока та робочі параметри при термообробці (пастеризації); ступінь концентрації білка (ультрафільтрація і діалізація для вимивання лактози, що використовується для МРС 65 або більше); робочі параметри при видаленні води (випаровування і розпилювальна сушка); умови зберігання кінцевого продукту ($T_{max} = 20^{\circ}C$, герметична упаковка). Завдяки ультрафільтрації рівень білка в КМБ може контролюватися, що дозволяє виробляти широкий спектр білкових концентратів. Загалом, всі ці концентрати містять однаково співвідношення казеїну та сироваткового білка, присутнього в вихідному сирому молоці. Проте сьогодні існує тенденція до отримання КМБ з дещо більшим вмістом казеїну [21-23].

Концентрат молочних білків корисний при вспінанні й збиванні. Білки у КМБ діють на межі розділу повітря/вода, утворюючи стабільну плівку бульбашок повітря. Це стабілізує безе, муси, тістечка, морозиво, збиті вершки і суфле. Білки в КМБ діють на межі розділу олія/вода, утворюючи і стабілізуючи жирові емульсії в ковбасах і іншому обробленому м'ясі, молочних напоях, супах, вінегретах, соусах і хлібобулочних виробках. КМБ має важливе значення в багатьох областях застосування, оскільки може збільшити в'язкість харчового продукту завдяки своїй внутрішній структурі білка. Лактоза і білки в КМБ піддаються реакції Майяра, що призводить до привабливого кольору для хлібобулочних виробів, таких як випічка і кекси. Оскільки МРС практично не має смаку, він дозволяє іншим ароматам їжі повністю розвиватися [25].

Ключові процеси, які використовують для виробництва КМБ, тобто УФ, ДФ і сушіння, змінюють сольову рівновагу між колоїдною і розчинною фазами системи стабілізації білка. Будь-яке відхилення може згубно вплинути на молочні білки та на функціональні властивості, такі як розчинність [2,9,21-25].

Одним з надійних і добре досліджених способів зберігання є сушіння.

Сушіння являє собою досить складний технологічний тепломасообмінний процес видалення вологи сировини під впливом тепла, або інших факторів з метою подовження терміну зберігання.

Відомі на сьогодні способи сушіння відрізняються в першу чергу способом підводу тепла до об'єкту сушіння. Застосовують найширше конвективний і кондуктивний (контактний) способи. Рідше, внаслідок дороговизни, використовують підвід тепла термовипромінюванням, наприклад, інфрачервоними променями, і у полі токів високої і надвисокої частоти [26-29].

Для сушіння рідких білкових концентратів можна застосовувати розпилювальні сушарки, сушарки з завислим шаром інертних носіїв і валкові сушарки. Перші два типи відносяться до конвективних апаратів сушіння.

Основним недоліком розпилювальних сушарок є складність конструкції і відносно великі габарити,

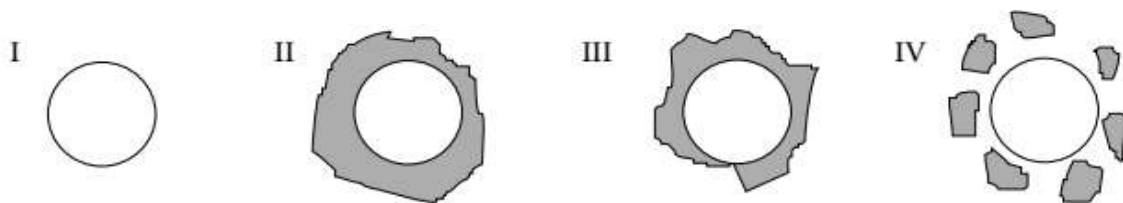
недостатнє використання об'єму сушильної камери, підвищені витрати тепла на випаровування вологи (на 1 кг вологи, що випаровується, до 2,5-4 кг водяної пари як енергоносія) [26].

Інтенсифікація розпилювального сушіння реалізується у сушарках із завислим шаром інертних носіїв.

Принципово процес сушіння полягає в тому, що рідкий продукт пневматичними форсунками розпилюють на шар гранул інертного матеріалу - носія, які знаходяться у стані псевдорідини під дією потоку повітря. Краплі матеріалу осідають на поверхні гранул та швидко висушуються гарячим повітрям. Внаслідок зіткнення і тертя гранул суха речовина відокремлюється, подрібнюється і виноситься повітрям з сушильної камери. У апараті забезпечується висока швидкість процесу сушіння через велику сумарну площу поверхні гранул, на яких осідає продукт, і через безперервний процес оновлення цієї поверхні [26,30].

Найбільш поширені типи сушарок з інертними носіями добре описані в [31,32], сушарка для струменевого шару [33], пневматична сушарка [34], ротаційна сушарка [35], сушарка з вертикальним внутрішнім конвексним гвинтом [36] тощо.

Механізм сушіння рідин на інертних носіях наведений на рис. 1.



I – нагрів; II – обвалювання; III – сушіння; IV – відокремлення, подрібнення

Рис. 1 – Механізм сушіння рідин на інертних носіях

Подібні сушарки добре зарекомендували себе при сушінні рідин багатих білком або полісахаридами (пектином, крохмалем).

Для сушіння рідких концентрованих білкових продуктів придатні кондуктивні сушарки вальцевого типу. На таких сушарках можна сушити рідини з високою в'язкістю, навіть пюреподібні за консистенцією. Витрати пари становлять 1,2-1,4 кг на 1 кг вологи, що випаровується. Висушений продукт має якість та розчинність нижчу ніж у розпилювальних сушарках та сушарках завислого шару на інертах [26].

Звісно, що описаними конструкціями сушильних установок не обмежується все різноманіття сушильної техніки вітчизняних і закордонних виробників. Кожен виробник технічно удосконалює базові варіанти, що описані вище, застосовує ноу-хау при інтенсифікації сушіння твердих і рідких об'єктів.

Використання як вихідної сировини маслянки доцільно завдяки її високій харчовій та біологічній цінності. Білки маслянки містять усі білкові фракції: казеїн та сироваткові білки, амінокислотний набір яких включає всі незамінні амінокислоти та білки мембран жирових глобул, які характеризуються високим вмістом сірковмісних амінокислот – метіоніну, цистину і цистеїну, що мають виражені протисклеротичні властивості. Маслянка містить в мембранах жирових глобул фосфоліпіди, що мають високі біологічно-активні властивості, протівірусні і протиракові ефекти. Фосфоліпіди відіграють важливу роль у нормалізації жирового та холестеринового обміну, знижують ризик розвитку серцево-судинних захворювань. Найбільш важливим з фосфоліпідів є фосфатидилхолін (лецитин), який бере участь в утворенні складних біологічних структур ядер клітин. Маслянка містить лецитин у найактивнішій формі – у вигляді білково-лецитинового комплексу, а жир маслянки містить біологічно високоцінні жири

кислоти, які мають антисклеротичні властивості: лінолеву, ліноленову та арахідонову. Використання маслянки нічим не лімітується. Вона може споживатися практично без обмеження щодня у всіх вікових групах населення [37-38].

Із вищенаведеного витікає, що виробництво сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки, отриманого мембранними методами та висушеного у завислому шарі інертних носіїв є актуальним завданням.

Матеріали і методи досліджень

Маслянка, отримана при виробництві вершкового масла способом періодичного збивання на підприємстві «ГМЗ №1» м. Одеса, була об'єктом ультрафільтраційного концентрування та діалізації з метою отримання безлактозного білково-ліпідного концентрату.

У експериментах застосовували порожнистволоконні ультрафільтраційні (УФ) мембрани ВПУ-15 та нанофільтраційні (НФ) плоскі мембрани ОПМН-П виробництва «Владипор» (Росія). Обидва типи мембран використовувались у складі лабораторних мембранних установок. Для сушіння використовували лабораторну установку завислому шару з інертними носіями. У дослідженні застосовувались стандартні методики визначення складових маслянки, її продуктів УФ, НФ та

отриманого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки.

Дана робота є продовженням праць авторів [39,40].

Результати досліджень та їх обговорення

Застосування в лабораторних умовах ультрафільтраційної обробки маслянки з фактором концентрування (ФК) 4 та 5 отримано рідкі концентрати, що містять високі концентрації білків та фосфоліпідів (УФ-ретентат), та УФ-пермеат. Вміст лактози в одержаному УФ ретентаті становить 4,5%. Подальше здійснення діалізації УФ ретентата нанофільтраційним пермеатом, одержаним після нанофільтрації УФ пермеата маслянки, дозволив повністю видалити лактозу та зберегти усі вихідні мінеральні речовини маслянки.

Ультрафільтраційний концентрат маслянки отримували на установці УПЛ-0,6 з поволоконним модулем АР-0,2 з мембранами ВПУ-15. Матеріал мембран – поліамід.

Хімічний склад маслянки-сировини та продуктів її ультрафільтрації наведений в табл. 1.

Нанофільтраційний пермеат отримували при нанофільтрації УФ фільтрата маслянки при ФК=5 в плоскорамній мембранній установці, що оснащена мембранами з ефірів целюлози ОПМН-П.

Хімічний склад продуктів нанофільтрації ультрафільтраційного пермеату маслянки наведений в табл. 2.

Таблиця 1 – Хімічний склад вихідної сировини та продуктів ультрафільтрації

Вихідна сировина /продукти ультрафільтрації	Показник			
	Масова частка білків, %	Масова частка лактози, %	Масова частка жиру, %	Масова частка мінеральних солей, %
Ультрафільтрація (ФК = 4)				
Маслянка-сировина	3,20±0,05	4,50 ± 0,06	0,40±0,10	0,70±0,05
Пермеат	0,13±0,05	4,50 ± 0,06	-	0,70±0,05
Ретентат	12,81±0,05	4,53 ± 0,06	1,61±0,10	1,03±0,05
Ультрафільтрація (ФК = 5)				
Маслянка-сировина	3,20±0,05	4,50 ± 0,06	0,40±0,10	0,70±0,05
Пермеат	0,16±0,05	4,47 ± 0,06	-	0,70±0,05
Ретентат	16,06±0,05	4,53 ± 0,06	2,01±0,10	1,11±0,05

Таблиця 2 – Хімічний склад продуктів нанофільтрації ультрафільтраційного пермеату маслянки

Продукти мембранної обробки вторинної молочної сировини	Масова частка білків, %	Масова частка лактози, %	Масова частка мінеральних солей, %
Нанофільтрація (ФК = 5)			
УФ-пермеат маслянки (ФК=4)	0,13±0,05	4,50±0,06	0,70±0,05
НФ-пермеат	–	сліди	0,70±0,05
НФ-ретентат	0,64±0,05	22,3±0,06	0,73±0,05
Нанофільтрація (ФК = 5)			
УФ-пермеат маслянки (ФК=5)	0,16±0,05	4,50±0,06	0,70±0,05
НФ-пермеат	–	сліди	0,70±0,05
НФ-ретентат	0,80±0,05	22,5±0,06	0,73±0,05

Одержання рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки відбувалось наступним чином. Маслянку пастеризували при 85-87 °С протягом 5 хвилин, охолоджували до 45-50 °С і проводили ультрафільтрацію при $P = 0,15$ МПа з фактором концентрування 4 або 5 до заданого вмісту білків і жирів, одержаний після ультрафільтрації пермеат піддавали нанофільтрації при $P = 1,5$ МПа з фактором концентрування 5, одержаний після якої ретентат відділяли, а пермеатом

здійснювали діафільтрацію одержаного після ультрафільтрації ретентату при $P = 0,15$ МПа (при діаб'ємі = 7). Після діафільтрації отримали рідкий безлактозний молочно-білковий концентрат маслянки (ДФ-ретентат), який пастеризували при 80 °С протягом 15-20 с, охолоджували до 2-6 °С, розливали у стерильну тару та зберігали не довше 7 діб.

Хімічний склад рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки наведений в табл. 3.

Таблиця 3 – Хімічний склад рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки, отриманого діафільтрацією УФ ретентату (ФК=4 та 5) НФ пермеатом, що отриманий нанофільтрацією (ФК=5) УФ пермеату маслянки

Показник	Рідкий безлактозний білково-ліпідний концентрат маслянки (ББКМ), одержаний діафільтрацією (DV=7) УФ ретентату маслянки, отриманого ультрафільтрацією при:	
	ФК=4	ФК=5
Масова частка сухих речовин, %, в т.ч.:	15,10±0,01	18,76±0,01
- масова частка лактози, %	0,01±0,01	0,01±0,01
- масова частка білку, %	12,74 ± 0,05	16,01 ± 0,05
- масова частка жиру, %	1,61 ± 0,01	2,03 ± 0,01
- масова частка фосфоліпідів, мг%	428,64±0,03	558,52±0,03
- масова частка золи, %	0,70 ± 0,07	0,70 ± 0,07

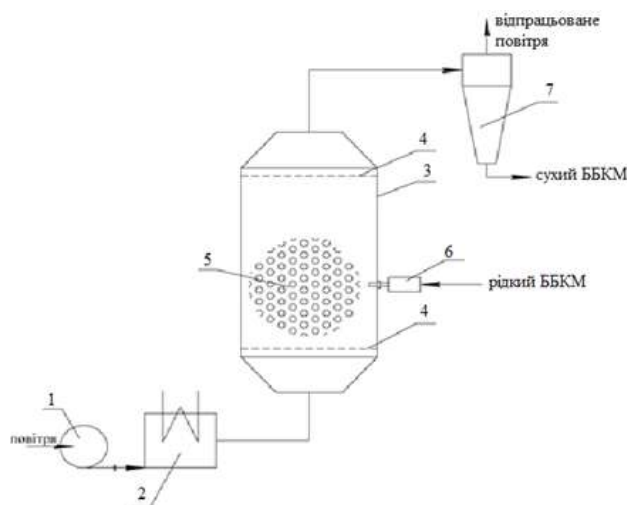
Отже, отриманий рідкий безлактозний білково-ліпідний концентрат маслянки має підвищений вміст сухих речовин (особливо за рахунок білків), мінеральний склад ідентичний нативному складу вихідної сировини, не містить лактозу та моноцукри (глюкозу та галактозу) та має підвищений вміст фосфоліпідів, які покращують показники холестерину в крові, знижують ризик розвитку серцево-судинних захворювань. У маслянці-сировині вміст фосфоліпідів становив $129,89 \pm 0,1$ мг%.

Подібні безлактозні молочно-білкові концентрати у рідкому стані мають обмежений термін зберігання, оскільки являють собою високопоживне середовище для розвитку мікроорганізмів і швидко псуються. Тому, виробництво сухих безлактозних молочно-білкових концентратів має тенденцію до зростання. Подовжений термін зберігання підвищує їх попит на світовому ринку і розширює їх застосування у інших галузях харчової промисловості.

Виробництво сухих молочних продуктів засновано на принципі пригнічення мікробних процесів шляхом видалення максимальної кількості води із молока. При цьому бактеріальна клітина зневоднюється і впадає в стан плазмолізу і через деякий час гине.

У роботі отриманий рідкий ББКМ зневоднювали на сушарці із завислим шаром інертних носіїв.

Принципальна схема сушильної установки з завислим шаром інертних носіїв наведена на рис. 2.



1 - Вентилятор; 2 - Калорифер; 3 - Корпус камери; 4 - Газорозподільна плита; 5 - Інертні носії; 6 - Розпилювальний пристрій; 7 - Циклон

Рис. 2 – Принципальна схема сушильної установки з завислим шаром інертних носіїв

У процесі сушіння у фонтануючому шарі велике значення має правильний вибір інертного носія. З огляду на вимоги, які пред'являють до інертного носія, в якості інертного носія використовували фторопласт-4. Фторопласт-4 – матеріал білого кольору, не змочується водою і не набухає в ній. Фторопласт-4 не розчиняється ні в одному з відомих розчинників, на нього діє тільки

фторований бензин. Він стійкий до всіх кислот і руйнується тільки при дії розплавлених лужних металів і елементарного фтору. Фторопласт-4 може експлуатуватися при температурах від мінус 60 до +230 °С, при нагріванні він не переходить в в'язко-текучий стан.

Дослідження впливу форми і розміру інертного носія на процес сушіння проводили на інертному носії в формі кульок і кубиків.

Як відомо, найкращою формою для створення фонтануючого шару є кубічна. Кубики в процесі сушіння безперервно обертаються навколо своїх осей, завдяки чому відбувається зрив прикордонного шару вологи, що випаровується і процес сушіння протікає більш інтенсивно.

З метою визначення впливу розміру кубиків на процес сушіння, використовували кубики з розміром грані 5 і 10 мм. При застосуванні фторопластових кубиків розміром грані 5 мм відбувається краще перемішування інертного матеріалу, не спостерігається екранування поверхні випаровування кубиків; поверхня випаровування в 2 рази вища, ніж при використанні кубиків з розміром грані 10 мм, підвищується потужність установки.

З огляду на вищесказане всі подальші досліді проводили на фторопластових кубиках з розміром грані 5 мм.

Гідродинаміка фонтануючого шару

Техніка створення фонтануючого шару наступна. При проходженні повітря через шар матеріалу, що знаходиться в камері з постійно розширюючим перетином, гідравлічний опір шару зростає і досягає максимального значення.

У цій точці відбувається втрата стійкості, після досягнення якої починається падіння гідравлічного опору і матеріал з нерухомого стану переходить в стан перемішування частинок. Цьому стану відповідає початок фонтанування. При цьому продовжується зниження гідравлічного опору шару до значень швидкості повітря, відповідної сталого фонтанування. При стійкому фонтануванні відбувається інтенсивний рух і перемішування матеріалу в межах об'єму конічної частини камери. Швидкість, що відповідає сталому фонтануванню, є робочою. Стан стійкого фонтанування залежить як від розміру і форми частинок, так і від розміру робочої камери. Подальше збільшення повітря призводить до підвищення висоти фонтануючого шару до верху циліндричної частини камери і до виносу матеріалу з робочої камери. Таким чином, верхньою межею швидкості повітря служить швидкість, що відповідає швидкості стійкого фонтанування.

Дослідження гідродинаміки фонтануючого шару інертного матеріалу проводили при його завантаженні в сушильну камеру в кількості від 2 до 4 кг.

На рис. 3 та рис. 4 наведені графіки залежності гідравлічного опору від швидкості теплоносія.

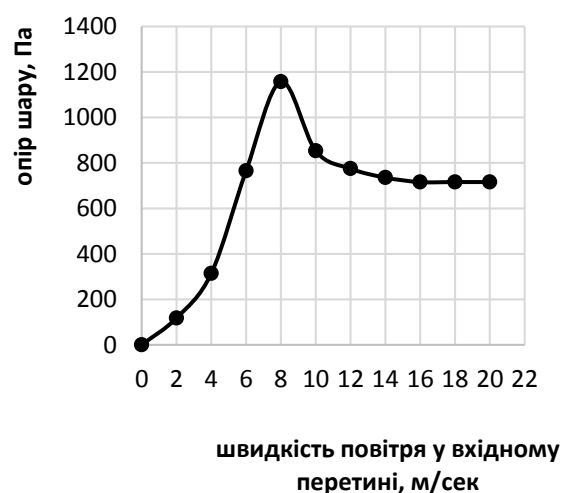


Рис. 3 – Залежність гідравлічного опору від швидкості теплоносія (кількість інертного носія 3 кг)



Рис. 4 – Залежність гідравлічного опору від швидкості теплоносія (кількість інертного носія 2 кг)

Аналізуючи графіки на рис. 3 та рис. 4, встановили, що максимальний гідравлічний опір шару складає 833,56 і 1176,8 Па відповідно для 2 і 3 кг інертного носія. Цим значенням відповідала швидкість 7,0 і 8,0 м/с. Швидкість стійкого фонтанування (або робоча швидкість) – 15 м/с. При цьому опір шару складав 441,3 і 735,5 Па для 2 і 3 кг інертного носія. При 4 кг інертного носія гідравлічний опір підвищувався до 2206,5 Па і напір вентилятора установки не забезпечував режиму стійкого фонтанування. В подальшому всі досліді проводили при робочій швидкості 15 м/с й кількості інертного носія 3 кг.

Вплив температури теплоносія на процес сушіння

Досліді проводили при наступних параметрах: концентрація розчину – 20%; кількість інертного носія – 3 кг; швидкість теплоносія – 15 м/с.

Температуру теплоносія змінювали від 100 до 160 °С з інтервалом 10 °С.

При температурі теплоносія вище 110 °С розчин, потрапляючи на інертний носій, висихав миттєво і вихід сухого порошку спостерігався відразу ж після подачі розчину. Зниження температури нижче 100 °С не дозволяє успішно використовувати фонтануючий шар, тому що при цих температурах тривалість сушіння збільшується і внаслідок нарощування товщини шару підсушеного розчину на поверхні інертного матеріалу зростає опір інертних тіл, що веде до порушення структури фонтануючого шару.

Залежність продуктивності установки і розчинності сухого ББКМ від температури теплоносія показана у табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив температури теплоносія на показники якості сухого ББКМ та потужність сушарки

№ дослід у	Температура теплоносія, °С	Вологість, %	Розчинність, %	Потужність за розчином, дм ³ /год
1	90	6,12	92,0	0,8
2	100	5,46	93,0	0,9
3	110	4,95	95,0	1,0
4	120	4,34	96,0	1,2
5	130	3,89	96,0	1,9
6	140	3,49	92,0	2,0
7	150	3,41	87,0	2,2
8	160	3,40	78,0	2,4

З табл. 4 видно, що підвищення температури теплоносія від 100 до 160 °С збільшує продуктивність установки при незмінних інших параметрах. Із збільшенням температури теплоносія вологість готового продукту знижується. При температурі сушильного агента вище 130 °С різко знижується розчинність продукту. Це пов'язано насамперед із білковою частиною ББКМ. Білок в молочних концентратах є найбільш лабільним компонентом. Саме зміна властивостей білка накладає в першу чергу обмеження на режими теплової обробки молочних концентратів. Білковій молекулі в нативному стані притаманна характерна для неї просторова структура, яку називають конформацією. При певних значеннях температури (вище 50-60 °С), рН, концентрації солей в розчині відбувається перехід компактної глобулярної структури молекули білка в хаотичний клубок, при цьому різко зменшується розчинність білка, змінюється спектр поглинання, в'язкість, стійкість до протеолізу, тобто відбувається денатурація білка. Зниження розчинності білка при денатурації пояснюється тим, що в нативному стані білок найбільш гідратований, при цьому гідрофобні вуглеводневі радикали зосереджені у внутрішній

частині глобули, тоді як на її поверхні переважно розташовуються полярні функціональні групи, що полегшують змочування і розчинення білка. Виходячи з цього, при інших рівних умовах гідратація зневодненого білка в нативному стані супроводжується великим тепловим ефектом в результаті приєднання до молекули більшої кількості молекул води, ніж при гідратації денатурованого білка. Крім того, при сушінні в результаті фізико-хімічних процесів випадає осад фосфат кальцію, виділяється із жирових кульок вільний жир. Ці зміни приводять до часткового зниження розчинності, які залежать від форми, розміру, внутрішньої структури частинок, кількості вільного жиру на їх поверхні, вмісту в порошок повітря тощо. Ці показники визначаються способом сушіння. При температурах сушильного агента 90-100 °С продукт виходить із сушарки із підвищеним вмістом вологи (більше 5%). Підвищена вологість знижує температуру денатурації білків ББКМ, тому розчинність концентратів при температурах сушильного агента 90 та 100 °С нижча, ніж при 110-130 °С. До того ж підвищена волога у продукті при зберіганні може призвести до погіршення їх показників якості.

Таким чином максимальна температура сушильного агента повинна становити 125-130 °С. Кінцева температура продукту – 55-60 °С.

Вплив концентрації розчину рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки на процес сушіння.

Сушили розчин ББКМ з концентрацією від 15 до 30% з інтервалом 5%; швидкість теплоносія - 15 м/с; температура сушильного агента – 130 °С; кількість інертного носія – 3 кг. Температура концентрату перед сушінням – 65-70 °С.

Дані дослідів зведені у табл. 5.

Таблиця 5 – Вплив концентрації розчину ББКМ на потужність сушарки

№ дослід у	Концентрація розчину ББКМ, %	Вологість, %	Потужність за розчином, дм ³ /год
1	15,0	3,69	1,3
2	20,0	3,89	1,9
3	25,0	5,25	2,2
4	30,0	6,22	2,4

Результати дослідів показують, що зі збільшенням концентрації розчину ББКМ продуктивність установки збільшується. Це пояснюється тим, що з підвищенням концентрації розчину процес сушіння відбувається інтенсивніше за рахунок зниження кількості вологи, що випаровується, розміри сухих частинок зменшуються. При концентрації вище 25% розчин має в'язку консистенцію, що ускладнює розпилення вихідного продукту в сушильній установці (впливає на розмір

краплі при розпилюванні), а отриманий продукт має підвищений вміст води.

Таким чином, в результаті лабораторних досліджень визначений раціональний режим сушіння ББКМ у фонтануючому шарі із інертними носіями: температура повітря на вході 125-130 °С; температура продукту на виході з сушарки – 55-60 °С; швидкість повітря у вхідному перетині – 15-20 м/с; масова частка сухих речовин у вхідному концентраті – не більше 20%; кінцева вологість сухого ББКМ – не більше 5,0%; інертний носій –

фторопласт у формі кубиків з розмірами грані 5 мм (співвідношення інертного носія і висушуваного розчину 1:3); спосіб подачі розчину у сушильну камеру – знизу у фонтануючий шар інертного наповнювача.

Висушений за даних умов ББКМ має високу якість, що підтверджується результатами досліджень, що наведені в табл.7,8.

Технологічна схема отримання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки наведена на рис. 5.

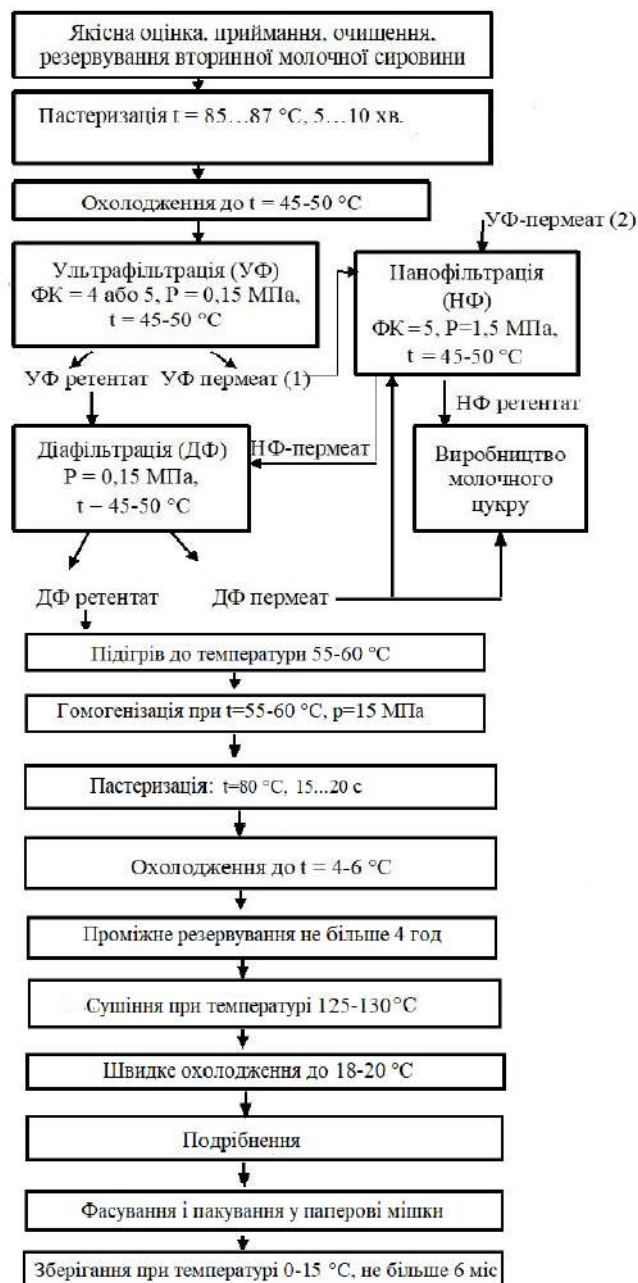


Рис. 5 – Технологічна схема отримання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки

Отриманий рідкий концентрат ББКМ за технологією, що наведена вище, після діафільтрації піддається нагріванню до температури 55-60 °С та

гомогенізується при цій температурі та тиску 15 МПа для зменшення кількості вільного жиру. Вільний жир негативно впливає на якість сухого продукту:

погіршується змочування сухого продукту, знижується швидкість його розчинення тощо. Відновлені продукти, що виготовлені з порошку, що мають на поверхні жирові краплі, при зберіганні набувають салистого присмаку і злежуються (утворюються комки).

Після гомогенізації ББКМ пастеризують 15-20 с при 80 °С для знищення патогенної вегетативної мікрофлори та інактивування ферментів, гормонів тощо.

Пастеризований концентрат охолоджують до температури 4-6 °С та направляють у проміжний резервуар для зберігання не більше 4 год. З резервуару розчин концентрату перед сушінням направляють на підігрів до температури 65-70 °С, що зумовлює раціональну в'язкість розчину та призводить до досягнення більшої ефективності та більш легкого розпилення під час процесу сушіння. Нагрівання дозволяє знизити енерговитрати на процес сушіння.

Сушіння здійснюють у сушарці фонтануючого шару інертних носіїв. Сушать концентрат з масовою часткою сухих речовин не більше 20% при температурі сушильного агента 125-130 °С. В процесі сушіння змінюються властивості і структура основних компонентів ББКМ (жиру, білків, солей; лактози в концентраті не більше 0,064%). Наряду із збільшенням жирових кульок в процесі сушіння спостерігається збільшення вільного (дестабілізованого) жиру. Збільшення вмісту вільного жиру також призводить до порушення режимів розпилення концентрату при сушінні (збільшення тиску тощо). При сушінні відбуваються: денатурація сироваткових білків і випадіння фосфату Са. В результаті знижується розчинність сухого ББКМ.

На виході із сушарки сухий продукт має температуру 55-60° С, яка вище точки плавлення молочного жиру. Це може призвести до руйнування оболонкової речовини жирових кульок і витоплювання жиру. У результаті може знижуватись розчинність сухого продукту, він окиснюється та гіркне. Для запобігання цього, сухий ББКМ перед подрібненням та розфасуванням швидко охолоджують до температури 18-20 °С. Охолоджений сухий ББКМ, що має вигляд пластівців розміром 3-4 мм, направляють на подрібнення. Порошок є однією з найбільш зручних форм для транспортування і зберігання ББКМ. Після подрібнення отримують сухий порошок із середнім лінійним розміром частинок 75-80 мкм. Необхідно забезпечити однаковий дисперсний склад частинок, оскільки значні коливання розмірів частинок погіршують розчинність ББКМ: більш дрібні частинки розчиняються швидше та частково осідають на більш великих, у результаті чого проникнення вологи всередину частинок ускладнюється. Відомо, що краще розчинення досягається за розмірів частинок сухого молока 70-100 мкм. Отриманий порошок ББКМ фасують у паперові пакети або

мішки, пакують, маркують та зберігають при температурі 0-15 °С не більше 6 місяців при відносній вологості повітря не більше 65%.

Отриманий за схемою (рис. 5) сухий ББКМ – дрібний порошок, що має білий з легким кремовим відтінком колір, чистий, молочний смак та запах, без сторонніх присмаків і запахів.

Фізико-хімічний склад сухого ББКМ, наведений в табл. 7, мікробіологічний склад – в табл.8.

Таблиця 7 – Фізико-хімічні показники сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки

Найменування показника	Значення	
	ФК=4	ФК=5
Масова частка вологи, %	4,71±0,01	4,19±0,01
Масова частка жиру, %	10,24±0,01	10,37±0,01
Масова частка фосфоліпідів, мг%	2315,34±0,03	2424,9±0,03
Масова частка білків, %	80,54±0,05	81,81±0,05
Масова частка золи, %	4,45±0,07	3,58±0,07
Масова частка кальцію, мг%	1413,19±0,1	1221,11±0,1

Сухі безлактозні ББКМ, як свідчать результати аналізу, що наведені в табл. 7, мають високий вміст білків (80,54-81,81%), фосфоліпідів (2315,34-2424,9 мг%), знижений вміст золи (3,58-4,45%) і кальцію (1221,11-1413,19 мг%), та практично не містять лактозу (не більше 0,064%).

Таблиця 8 – Мікробіологічні показники сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки

Назва показника	Значення
Кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КУО в 1 г продукту	1·10 ³
Бактерії групи кишкових паличок (коліформи), в 0,1 г	Не виявлено
Патогенні мікроорганізми, в тому числі бактерії роду Сальмонела, в 25 г	Не виявлено

Визначення БГКП у 1,0 см³ зразку сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки свідчить про їх відсутність у дослідженому об'ємі, що доводить правильність всіх режимів основних технологічних процесів. Відсутність БГКП та кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів на рівні 1·10³ КУО в 1 г

продукту відповідає вимогам нормативно-технічної документації.

Перспективи подальших досліджень. Метою подальших досліджень є визначення функціонально-технологічних властивостей та умов відновлення сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки.

Висновки

Визначений раціональний режим сушіння рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки у сушарці фонтануючого шару інертних носіїв: температура повітря на вході у сушарку – 125-130 °С; температура продукту на виході – 55-60 °С; швидкість повітря у вхідному перетині – 15-20 м/с; масова частка сухих речовин у вхідному концентраті – не більше 20%; кінцева вологість сухого ББКМ – не більше 5,0%; інертний носій – фторопласт у формі кубиків з розмірами грані 5 мм; спосіб подачі розчину у сушильну камеру – знизу у фонтануючий шар інертних носіїв.

Наведена технологічна схема виробництва сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки.

Визначені органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники отриманого сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки. Сухі безлактозні білково-ліпідні концентрати маслянки з високим вмістом білка (81,03-81,81%) забезпечують поліпшення білкової складової без додавання лактози до харчових продуктів (масова частка лактози не більше 0,064%). З додаванням сухих безлактозних білково-ліпідних концентратів до рецептури додатково вносяться цінні мінерали, такі як кальцій, магній і фосфор, що може зменшити потребу в додаткових джерелах цих мінералів.

Список літератури

1. Дейниченко, Г. В. Использование пахты для получения молочно-белкового концентрата / Г. В. Дейниченко, Т. И. Юдина // *Нові технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб. наук. пр.* – Харків: ХДАТОХ, 1999. – С. 23-26.
2. Ganga, S. M. Physico-chemical, functional and rheological properties of milk protein concentrate 60 as affected by disodium phosphate addition, diafiltration and homogenization / S. M. Ganga, K. S. Ashish, R.P. Narender, A. Sumit, B. Sanket, S. Rajan, K. G. Vijay // *J. Food Sci Technol.* – 2017. – 54(6). – P. 1678-1688.
3. Kelly, P. M. Milk protein concentrate. / P. M. Kelly // *Fuquay JW, Fox PF, McSweeney PLH. Encyclopedia of Dairy Science, 2nd Edition.* – Amsterdam: Elsevier – 2011. – P. 848-854.
4. Ganga, S. M. Milk protein concentrates: opportunities and challenges / S. M. Ganga, K. S. Ashish, R. P. Narender, A. Sumit // *J. Food Sci. Technol.* – 2017 Sep. – 54(10) – P. 3010-3024.
5. Agarwal, S. Innovative uses of milk protein concentrates in product development / S. Agarwal, R.L. Beausire, S. Patel, H. Patel // *J. Food Sci.* – 2015. – 80(S1). – P. A23-A29. – doi: 10.1111/1750-3841.12807.
6. Patel, H. Milk protein concentrates: Manufacturing and applications / H. Patel, S. Patel Agarwal // *US Dairy Export Council.* – 2014. – P. 3-4.
7. Havea, P. Protein interactions in milk protein concentrate powders / Havea P. // *Int Dairy J.* -2006. – 16(5). – P. 415-422. – doi: 10.1016/j.idairyj.2005.06.005.
8. Tong, P. S. The future of dairy ingredients: critical considerations that will underpin future success / P. S. Tong, G. W. Smither // *Smithirs GW, Augustin MA, editors. Advances in dairy ingredients.* – 1. Hoboken: Wiley. – 2013. – P. 313-317.
9. Sikand, V. Solubility of commercial milk protein concentrates and milk protein isolates / V. Sikand V, P. S. Tong, S. Roy, L. E. R. Saona, B. A. Murray // *J Dairy Sci.* – 2011. – 94. – P. 6194-6202. – doi: 10.3168/jds.2011-4477.
10. Alvarez, V. B. Physical properties of ice cream containing milk protein concentrates / V. B. Alvarez, C. L. Wolters, Y. Vodovotz, T. Ji // *J Dairy Sci.* – 2005. – 88. – P. 862-871. – doi: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72752-1.
11. Fang, Y. Functionality of milk protein concentrate: effect of spray drying temperature / Y. Fang, S. Rogers, C. Selomulya, X. D. Chen // *Biochem Eng J.* – 2012. – 62. – P. 101-105. – doi: 10.1016/j.bej.2011.05.007.
12. Guiziou, G. G. Concentrated milk and powders / G. G. Guiziou // *Tamime AY, editor. Membrane processing: dairy and beverage applications.* – 1. Hoboken: Wiley. – 2013. – P. 128-140.
13. McCarthy, N. A. Dissolution of milk protein concentrate (MPC) powders by ultrasonication / N. A. McCarthy, P.M. Kelly, P. G. Maher, M.A. Fenelon // *J. Food Eng.* – 2014. – 126. – P. 142-148. – doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.11.002.
14. Yanjun, S. Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate / S. Yanjun, C. Jianhang, Z. Shuwen, L. Hongjuan, L. Jing, L. Lu, H. Uluko, S. Yanling, C. Wenming, G. Wupeng, L. Jiaping // *J. Food Eng.* – 2014. – 124. – P. 11-18. – doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.09.013.
15. Agarwal, S. Innovative uses of milk protein concentrates in product development / S. Agarwal, R. L. Beausire, S. Patel, H. Patel // *J. Food Sci.* – 2015. – 80(S1). – P. A23-A29. – doi: 10.1111/1750-3841.12807.
16. Lagrange, V. Global market for dairy proteins / V. Lagrange, D. Whitsitt, C. Burris // *J. Food Sci.* – 2015. – 80. – A16-A22. – doi: 10.1111/1750-3841.12801.
17. Юдіна, Т. І. Наукове обґрунтування технологій структурованої кулінарної продукції з використанням концентратів склотин: дис. докт. техн. наук: 05.18.16 / Юдіна Тетяна Іллівна. – Київ, 2016. – 406 с.
18. Орлова, Т. А. Использование фракционирования молочного сырья полисахаридами в производстве функциональных продуктов питания / Т. А. Орлова // *Хранение и переработка сельхозсырья.* – 2003. – №8. – С. 96-97.
19. Гніцевич, В. Технологія та біологічна цінність молочно-білкових копреципітатів / В. Гніцевич, Т. Юдіна, Л. Дейниченко // *Товари і ринки.* – 2016. – 2. – С. 148-157.

20. **Mistry, V. V.** Manufacture and application of high milk protein powder / **V. V. Mistry** // *Lait*. - 2002. -82. - P. 515-522.
21. **Ye, A.** Functional properties of milk protein concentrates: emulsifying properties, adsorption and stability of emulsions / **A. Ye** // *Dairy J.* - 2011. - 21(1). - P. 14-20.
22. **Crowley, S. V.** Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders / **S. V. Crowley, I. Gazi, A. L. Kelly, T. Huppertz, J. A. O'Mahony** // *J. Food Eng.* - 2014. - 135. - P. 31-38. - doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.03.005.
23. **Cao, J.** Short communication: effects of nanofiltration and evaporation on the physicochemical properties of milk protein during processing of milk protein concentrate / **J. Cao, W. Zhang, S. Wu, C. Liu, Y. Li, H. Li, L. Zhang** // *J. Dairy Sci.* - 2012. - 98(1). - P. 100-105.
24. **Sikand, V.** Effect of adding salt during the diafiltration step of milk protein concentrate powder manufacture on mineral and soluble protein composition / **V. Sikand, P. Tong, J. Walker** // *Dairy Sci Technol.* - 2013. - 93(4). - P. 401-413.
25. **Baldwin, A. J.** Insolubility of milk powder products — a mini review / **A. J. Baldwin** // *Dairy Sci. Technol.* - 2010. - 90. - P. 169-179.
26. **Бондар, С. М.** Технології поводження з технологічними відходами харчової промисловості: навчальний посібник / **С. М. Бондар**. - Одеса: Астропринт, 2010. - 120 с.
27. **Будрик, В. Г.** Ресурсосбереження при совершенствовании производства сухих молочных продуктов / **В. Г. Будрик, А. И. Бурькин** // *Переработка молока*. - 2015. - 12. - С. 28-31.
28. **Кузнецов, П. В.** О выборе оборудования для сушки молока и сыворотки / **П. В. Кузнецов, В. Т. Габриелова, П. Мертин** // *Молочная промышленность*. - 2015. - 3. - С. 34-37.
29. **Пахомов, А. Н.** Интенсификация процесса сушки жидкой послеспиртовой барды в аппарате с кипящим слоем инертных тел / **А. Н. Пахомов, Н. С. Сорокина, А. В. Баландина** // *Инженерный вестник Дона*, 2014. - 4. - URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2727.
30. **Gyenis, J.** Drying of Heat Sensitive Materials of High Moisture Content in Mechanically Spouted Bed of Inert Particles / **J. Gyenis, E. Pallai-Varsányi, J. Tóth** // *Reliable Flow of Particulate Solids - IV. International Symposium*, 2008. - Tromso, Norvégia.
31. **Kudra, T.** Advanced Drying Technologies / **T. Kudra, A. S. Mujumdar**. - New York: by Taylor & Francis Group, LLC, 2009. - 455 p.
32. **Re, H. J.** Drying of Pastelike Materials in Spouted Bed / **H. J. Re, J. T. Freire** // *Proc. of The6th Intern. Drying Symposium, IDS'88*. - Versailles, France. - 1988. - P.119.
33. **Markowski, A. S.** Drying characteristics in a jet- spouted bed dryer / **A. S. Markowski** // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. - 1992. - T. 70. - №. 5. - P. 938-944.
34. **Blasco, R.** Pneumatic suspension drying. / **R. Blasco, G. Diaz, A. Reyes** // *Drying'96. C. Proc. 10th International Drying Symposium (IDS'96)* - Krakow. - 1996. - P. 427-434.
35. **Limaverde, J. R.** Pastelike materials drying in rotary dryer with inert bed / **J. R. Limaverde, Jr. Limaverde, J. R. D. Finzer** // *Proc. 12th International Drying Symposium (IDS2000)*. - Noordwijkerhout. - The Netherlands (CD-ROM, P. 341).
36. **Pallai, E.** Spouted bed drying / **E. Pallai, T. Szentmarjay A. S. Mujumdar** // *Handbook of Industrial Drying. A. S. Mujumdar (Ed.). 3rd ed.* - Boca Raton. - 2012. - P. 363-384.
37. **Остроумов, Л. А.** Пахта — продукт высокой технологической ценности / **Л. А. Остроумов, И.А. Мазеева** // *Молочная промышленность*. - 2009. - № 7. - С. 52.
38. **Храмцов, А. Г.** Технология продуктов из вторичного молочного сырья: Учебное пособие / **А. Г. Храмцов, С. В. Василсин, С. А. Рябцева, Т. С. Воротникова**. - СПб.: ГИОРД, 2009. - 424 с.
39. **Bondar, S.** Дослідження мембранного процесу видалення лактози з концентрату маслянки / **S. Bondar A. Trubnikova, O. Chabanova** // *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. - 2018. - Т. 20. - №. 85. - С. 62-69. - doi: 10.15421/nvlvet8512.
40. **Bondar, S.** Analysis of a new diafiltration method of cleaning buttermilk from lactose with mineral composition preserved / **S. Bondar, O. Chabanova, T. Sharakhmatova, A. Trubnikova** // *Харчова наука та технологія*. - 2018. - Т. 12. - №. 1. - С. 90-98. -doi: 10.15673/fst.v12i1.839.

References (transliterated)

1. **Dejnichenko, G. V., Judina, T. I.** Ispol'zovanie pahty dlja poluchenija molochno-belkovogo koncentrata [Using buttermilk to produce milk protein concentrate]. *Novi tehnologii ta udoskonalennja procesiv harchovih virobniciv: Zb. nauk. Pr [New Technologies and Improvements in Food Processes: Coll. Sciences. works]*. Harkiv, HDATOH, 1999, 23-26.
2. **Ganga, S. M., Ashish, K. S., Narender, R. P., Sumit, A., Sanket, B., Rajan, S., Vijay, K. G.** Physico-chemical, functional and rheological properties of milk protein concentrate 60 as affected by disodium phosphate addition, diafiltration and homogenization. *J. Food Sci. Technol.*, 2017, **54**(6), 1678-1688.
3. **Kelly, P. M.** Milk protein concentrate. In: Fuquay JW, Fox PF, McSweeney PLH. *Encyclopedia of Dairy Science, 2nd Edition*. Amsterdam: Elsevier; 2011, 848-854.
4. **Ganga, S. M., Ashish, K. S., Narender, R. P., Sumit, A.** Milk protein concentrates: opportunities and challenges. *J. Food Sci. Technol*, 2017, **54**(10), 3010-3024.
5. **Agarwal, S., Beausire, R. L., Patel, S., Patel, H.** Innovative uses of milk protein concentrates in product development. *Journal of food science*, 2015, 80, A23-A29, doi: 10.1111/1750-3841.12807.
6. **Patel, H., Patel, S., Agarwal, S.** Milk protein concentrates: Manufacturing and applications. *US Dairy Export Council*, 2014, 3-4.
7. **Havea, P.** Protein interactions in milk protein concentrate powders. *International Dairy Journal*, 2006, **16** (5), 415-422, doi: 10.1016/j.idairyj.2005.06.005.
8. **Tong, P. S., Smithers, G. W.** 12 The Future of Dairy Ingredients: Critical Considerations That Will Underpin Future Success. *Advances in Dairy Ingredients*, 2013, 313.
9. **Sikand, V., Tong, P. S., Roy, S., Rodriguez-Saona, L. E., Murray, B. A.** Solubility of commercial milk protein concentrates and milk protein isolates. *Journal of dairy science*, 2011, **94** (12), 6194-6202, doi: 10.3168/jds.2011-4477.
10. **Alvarez, V. B., Wolters, C. L., Vodovotz, Y., Ji, T.** Physical properties of ice cream containing milk protein

- concentrates. *Journal of Dairy Science*, 2005, **88** (3), 862-871, doi: 10.3168/jds.S0022-0302(05)72752-1.
11. **Fang, Y., Rogers, S., Selomulya, C., Chen, X. D.** Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, **62**, 101-105, doi: 10.1016/j.bej.2011.05.007.
 12. **Guiziou, G. G.** Concentrated milk and powders. *Membrane processing: dairy and beverage applications*. 1. Hoboken: Wiley; 2013, 128-140.
 13. **McCarthy, N. A., Kelly, P. M., Maher, P. G., Fenelon, M. A.** Dissolution of milk protein concentrate (MPC) powders by ultrasonication. *Journal of Food Engineering*, 2014, **126**, 142-148, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.11.002.
 14. **Yanjun, S., Jianhang, C., Shuwen, Z., Hongjuan, L., Jing, L., Lu, L., Jiaping, L.** Effect of power ultrasound pretreatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 2014, **124**, 11-18, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.09.013.
 15. **Agarwal, S., Beausire, R. L., Patel, S., Patel, H.** Innovative uses of milk protein concentrates in product development. *Journal of food science*, 2015, **80**, A23-A29, doi: 10.1111/1750-3841.12807.
 16. **Lagrange, V., Whitsett, D., Burris, C.** Global market for dairy proteins. *Journal of food science*, 2015, **80**, A16-A22, doi: 10.1111/1750-3841.12801.
 17. **Judina, T. I.** Naukove obgruntuvannya tehnologij strukturovanoj kulinarnoi produkcii z vikoristannjam koncentrativ skoltin: [Scientific substantiation of technologies of structured culinary production using concentrates of butterflies]. dis. dokt. tehn. nauk: 05.18.16, Kiiv, 2016, 406.
 18. **Orlova, T. A.** Ispol'zovanie frakcionirovanija molochного syr'ja polisaharidami v proizvodstve funkcional'nyh produktov pitanija [The use of dairy raw material fractionation by polysaccharides in the production of functional foods]. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ja [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 2003, **8**, 96-97.
 19. **Gnicevich, V., Judina, T., Dejnichenko, L.** Teh-nologija ta biologichna cinnist' molochno-bilkovih koprecipitativ [Technology and biological value of milk-protein coprecipitates]. *Tovari i rinky [Goods and markets]*, 2016, **2**, 148-157.
 20. **Mistry, V. V.** Manufacture and application of high milk protein powder. *Lait*, 2002, **82**, 515-522.
 21. **Ye, A.** Functional properties of milk protein concentrates: emulsifying properties, adsorption and stability of emulsions. *Int Dairy J.*, 2011, **21**(1), 14-20.
 22. **Crowley, S. V., Gazi, I., Kelly, A. L., Huppertz, T., O'Mahony, J. A.** Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. *J. Food Eng.*, 2014, **135**, 31-38, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.03.005.
 23. **Cao, J., Zhang, W., Wu, S., Liu, C., Li, Y., Li, H., Zhang, L.** Short communication: effects of nanofiltration and evaporation on the physicochemical properties of milk protein during processing of milk protein concentrate. *J. Dairy Sci*, 2011, **98**(1), 100-105.
 24. **Sikand, V., Tong, P. S., Walker, J.** Effect of adding salt during the diafiltration step of milk protein concentrate powder manufacture on mineral and soluble protein composition. *Dairy Sci Technol.*, 2013, **93**(4), 401-413.
 25. **Baldwin, A. J.** Insolubility of milk powder products – a mini review. *Dairy Sci. Technol.*, 2010, **90**, 169-179.
 26. **Bondar, S. M.** Tehnologii povodzhennja z tehnologichnimi vidhodami harchovoi promislivosti: navchal'nij posibnik [Technologies of handling the technological waste of the food industry: a manual], Odesa: Astro-print, 2010, 120.
 27. **Budrik, V. G.** Resursosberezhenie pri sovershenstvovanii proizvodstva suhikh molochnyh produktov [Resource conservation in improving the production of dry dairy products], *Pererabotka moloka [Milk processing]*, 2015, **12**, 28-31.
 28. **Kuznecov, P. V.** O vybore oborudovanija dlja sushki moloka i syvrotki [About the choice of equipment for drying milk and whey]. *Molochnaja promyshlennost' [Dairy industry]*, 2015, **3**, 34-37.
 29. **Pahomov, A. N.** Intensifikacija processa sushki zhidkoj poslepirtovoj bardy v apparate s kipjashhim sloem inertnyh tel [Intensification of the drying process of liquid distillery stillage in an apparatus with a fluidized bed of inert bodies], *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Journal of the Don]*, 2014, **4**, Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2014/2727.
 30. **Gyenis, J., Pallai-Varsányi, E., Tóth, J.** Drying of Heat Sensitive Materials of High Moisture Content in Mechanically Spouted Bed of Inert Particles. *Reliable Flow of Particulate Solids - IV. International Symposium*, 2008, Tromso, Norvėgia.
 31. **Kudra, T., Mujumdar, A. S.** Advanced Drying Technologies. New York: by Taylor & Francis Group, LLC, 2009, 455.
 32. **Re, H. J., Freire, J. T.** Drying of Pastelike Materials in Spouted Bed. *Proc. of The6th Intern. Drying Symposium, IDS'88*, Versailles, France, 1988, 119.
 33. **Markowski, A. S.** Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer. *Can. J. Chem. Eng.*, 1992, **70**(10), 938-944.
 34. **Blasco, R., Diaz, G., Reyes, A.** Pneumatic suspension drying. *Drying'96. C. Proc. 10th International Drying Symposium (IDS'96)*. Krakow, 1996, 427-434.
 35. **Limaverde, J. R., Limaverde, J. R., Jr., Finzer, J. R. D.** Pastelike materials drying in rotary dryer with inert bed. *Proc. 12th International Drying Symposium (IDS2000)*. Noordwijkerhout, The Netherlands (CD-ROM, 341).
 36. **Pallai, E., Szentmarjay, T. Mujumdar, A. S.** Spouted bed drying. In: *Handbook of Industrial Drying*. A. S. Mujumdar (Ed.). 3rd ed. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2007, 363-384.
 37. **Ostroumov, L. A., Mazeeva, I. A.** Pahta-produkt vysokoj biologicheskoy aktivnosti. [Buttermilk product of high biological activity], *Molochnaja promyshlennost' [Dairy industry]*, 2009, **7**, 52-53.
 38. **Hramcov, A. G., Vasilisin, S. V., Rjabceva, S. A., & Vorotnikova, T. S.** Tehnologija produktov iz vtorigchnogo molochного syr'ja [Technology of products from secondary dairy raw materials], 2009, 424.
 39. **Bondar, S., Trubnikova, A., Chabanova, O.** Doslidzhennja membrannogo procesu vydalennja laktozy z koncentratu maslyanky. [Research membrane process of removing lactose from concentrate oiler], *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 2018, **20**(85), 62-69, doi:10.15421/nvlvet8512.
 40. **Bondar, S., Chabanova, O., Sharakhmatova, T., & Trubnikova, A.** Analysis of a new diafiltration method of cleaning buttermilk from lactose with mineral composition preserved, 2018, **12**, 1, 90-98, doi:10.15673/fst.v12i1.839.

Відомості про авторів (About authors)

Трубнікова Анастасія Анатоліївна – аспірант кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0001-6971-136X; e-mail: sc228004@ukr.net.

Anastasia Trubnikova – postgraduate of Department of technology of milk, oil-fat products and cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, Ukraine, ORCID: 0000-0001-6971-136X; e-mail: sc228004@ukr.net.

Чабанова Оксана Борисівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-1455-2987; e-mail: oksana_chabanova17@ukr.net.

Oksana Chabanova – PhD, Associate Professor of Department of technology of milk, oil-fat products and cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1455-2987; e-mail: oksana_chabanova17@ukr.net.

Бондар Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-7908-2074; e-mail: sn_bondar@list.ru.

Sergey Bondar – PhD, Associate Professor of Department of Ecology and Environmental Technologies, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7908-2074; e-mail: sn_bondar@list.ru.

Шарахматова Тетяна Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молочних, олійно-жирових продуктів і косметики, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0001-6080-6995; e-mail: sharahmatova@ukr.net.

Tetyana Sharakhmatova – PhD, Associate Professor of Department of technology of milk, oil-fat products and cosmetics, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6080-6995; e-mail: sharahmatova@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Трубнікова, А. А. Одержання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки / **А. А. Трубнікова, О. Б. Чабанова, С. М. Бондар, Т. Є. Шарахматова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 86-99. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.10.

Please cite this article as:

Trubnikova, A., Chabanova, O., Bondar, S., Sharahmatova, T. Preparation of dry lactose protein-lipid concentrate of buttermilk. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 86-99, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Трубнікова, А. А. Получение сухого безлактозного белково-липидного концентрата пахты / **А. А. Трубнікова, О. Б. Чабанова, С. М. Бондар, Т. Е. Шарахматова** // *Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 86-99. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.10.

АННОТАЦІЯ Комплексна переробка пахты в безлактозні білкові концентрати, призначені для подальшої промислової переробки, в якості білкових обогачувачів або білкової основи в виробництві харчових продуктів, є актуальною. Безлактозний білково-ліпідний концентрат пахты отримували мембранними методами і висушували в взвешеному шарі інертних носіїв. В роботі наведено технологічну схему отримання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрата пахты. Визначено раціональний режим сушки рідкого безлактозного білково-ліпідного концентрата пахты в сушильці фонтануючого шару з інертними носіями: температура повітря на вході 125-130 °С; температура продукту на виході з сушильки - 55-60 °С; швидкість повітря в входному перетині - 15-20 м / с; масова частка сухих речовин в вихідному концентраті - не більше 20%; остаточна вологість сухого безлактозного білково-ліпідного концентрата пахты - не більше 5,0%; інертний носій - фторопласт в формі кубиків з розмірами грані 5 мм; спосіб подачі розчину в сушильну камеру - знизу в фонтануючий шар інертного носія. Визначено органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники отриманого сухого безлактозного білково-ліпідного концентрата пахты. Сухі безлактозні білково-ліпідні концентрати пахты з високим вмістом білка (81,03-81,819%) забезпечують покращення білкової складової частини без додавання лактози до харчових продуктів (масова частка лактози не більше 0,064%). Загальна кількість фосфоліпідів в отриманому сухому концентраті пахты становить 2687 мг%, що проявляє високі біологічно активні властивості. З додаванням сухих безлактозних білково-ліпідних концентратів до рецептури додатково вводяться цінні мінерали, такі як кальцій, магній і фосфор, що може зменшити потребу в додаткових джерелах цих мінералів. Визначення наявності бактерій групи кишечних паличок в 1,0 см³ зразка сухого безлактозного білково-ліпідного концентрата пахты свідчить про відсутність в досліджуваній кількості, доводить правильність всіх режимів основних технологічних процесів. По мікробіологічному показнику отриманий концентрат відповідає вимогам науково-технічної документації.

Ключові слова: безлактозний білково-ліпідний концентрат пахты; сушка; технологія; показники якості

Поступила (received) 15.08.2019

УДК 661.11

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.11

ФОТОКАТАЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ ШПІНЕЛЬНИХ ФЕРИТІВ $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), ОТРИМАНИХ ПІД ДІЄЮ КОНТАКТНОЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕРІВНОВАЖНОЇ ПЛАЗМИ

Л. А. ФРОЛОВА

кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ УДХТУ, УКРАЇНА
e-mail: 19kozak83@gmail.com

АНОТАЦІЯ Інтерес дослідників до системи $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ значно виріс за останні десятиліття. Це пов'язано з використанням феритів кобальту для виготовлення високочастотних пристроїв, в магнітно-резонансній томографії, біотехнології внаслідок високої магнітокрісталічної анізотропії, високої коерцитивності і помірної намагніченості насиченості, здатності зменшувати магнітні втрати на високих частотах. Одним із способів поліпшення магнітних властивостей феритових порошків є регулювання структури вихідного матеріалу. Гідрофазні методи синтезу, в тому числі інноваційні, є основою для створення перспективних і високотехнологічних феритових матеріалів. Тому закономірності їх формування є об'єктом всебічного вивчення. Особливість гідрофазного синтезу полягає в тому, що він дозволяє забезпечити високу стехіометрію і однорідність кінцевого продукту, більш низькі температури синтезу, ніж при твердофазному і порівняно просте і доступне обладнання. Метою дослідження було визначення кристалохімічних параметрів феритів кобальту зі структурою шпінелі в системі $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), встановлення залежності структури і магнітних характеристик сполук, що утворюються від складу, і визначення фотокаталітичної активності феритів кобальту в реакції розкладання 4-нітрофенолу. Порівняльне дослідження кобальтових феритів $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ з різним складом ($x = 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$), синтезованих за допомогою контактної низькотемпературної нерівноважної плазми показало, що композиції, відмінні від стехіометричних мають дефектну структуру. Середній розмір кристалітів розрахований з піків дифрактограм підтвердив діапазон розмірів 35,0 -41,8 нм. Намагніченість насиченості зразків зростає зі зменшенням мольного співвідношення катіонів. Максимальна коерцитивна сила відповідає стехіометричному складу. Вивчено фотокаталітичні властивості в реакції розкладання 4 нітрофенолу. Зі збільшенням вмісту кобальту ступінь розкладу 4-нітрофенолу зменшується.

Ключові слова: ферит кобальту; магнітна наночастинки; рентгенівська дифракція; УФ-спектри; коерцитивність; намагніченість

PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF SPINEL FERRITES $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$) OBTAINED BY TREATMENT OF CONTACT LOW-TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM PLASMA

L. FROLOVA

Department of Inorganic Materials Technology and Ecology, Ukrainian State University of Chemical Engineering, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT Researchers' interest in the $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ system has grown significantly over the past decades. This is due to the use of cobalt ferrite for the manufacture of high-frequency devices, in magnetic resonance imaging, biotechnology due to the high magnetocrystalline anisotropy, high coercivity and moderate saturation of the magnetization, the ability to reduce magnetic loss at high frequencies. One way to improve the magnetic properties of ferrite powders is to control the structure of the starting material. Hydrophase synthesis methods, including innovative ones, are the basis for creating promising and high-tech ferrite materials. Therefore, the laws of their formation are the subject of a comprehensive study. The peculiarity of hydrophase synthesis is that it allows for high stoichiometry and uniformity of the final product, lower synthesis temperatures than for solid phase) and relatively simple and affordable equipment. The aim of the study was to determine the crystallochemical parameters of cobalt ferrites with spinel structure in the $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0.25 < x < 1$) system, to determine the composition and magnetic characteristics of the resulting compounds as a function of composition, and to determine the photocatalytic activity of cobalt ferrites in the decomposition of 4-nitrophenol. A comparative study of $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ cobalt ferrites with different compositions ($x = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$) synthesized using contact low-temperature nonequilibrium plasma showed that compositions other than stoichiometric have a defective structure. The average crystallite size calculated from the diffraction pattern peaks confirmed a size range of 35.0 -41.8 nm. The saturation magnetization of samples increases with decreasing molar ratio of cations. The maximum coercive force corresponds to the stoichiometric composition. The photocatalytic properties in the decomposition reaction of 4 nitrophenol were studied. With an increase in cobalt content, the degree of decomposition of 4-nitrophenol decreases.

Keywords: cobalt ferrite; magnetic nanoparticles; X-ray diffraction; UV spectra; coercivity; magnetization of saturation

Вступ

Інтерес дослідників до системи $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ значно виріс за останні десятиліття. Це пов'язано з використанням феритів кобальту для виготовлення високочастотних пристроїв, в магнітно-резонансній томографії, біотехнології внаслідок високої

магнітокрісталічної анізотропії, високої коерцитивності і помірної намагніченості насиченості, здатності зменшувати магнітні втрати на високих частотах [1-3]. Саме на основі фериту кобальту були розроблені склади, що володіють спеціальними властивостями [4].

Одним із способів поліпшення магнітних властивостей феритових порошоків є регулювання структури вихідного матеріалу. Гідрофазні методи синтезу, в тому числі інноваційні, є основою для створення перспективних і високотехнологічних феритових матеріалів [1]. Тому закономірності їх формування є об'єктом всебічного вивчення. Детальне дослідження механізму модельних реакцій, які лежать в основі формування феритів, вказує на складний характер цього процесу, а однофазна структура фериту не є гарантією його хімічної однорідності. Здатність феритів утворювати безперервні ряди твердих розчинів, які до того ж містять різну кількість кисню і вакансій, призводить до того, що в межах однієї фази можуть існувати значні градієнти концентрації складових її компонентів, а це неприпустимо для феритів, властивості яких дуже чутливі до залишкових хімічних неоднорідностей. Все це спонукає до пошуку відмінних від класичної керамічної технології методів синтезу і, відповідно, вивчення кристалохімічної структури, аналізу фізико-хімічних характеристик феритів кобальту.

Особливість гідрофазного синтезу полягає в тому, що всі реагенти змішуються на атомарному або молекулярному рівні, що дозволяє забезпечити високу стехіометрію і однорідність розподілу частинок кінцевого продукту як за розмірами, так і з хімічної точки зору. Не менш важливою перевагою хімічних методів отримання є висока економічність (використовуються значно нижчі температури синтезу, ніж при твердофазному) і порівняно просте і доступне обладнання [5]. Використання феритів у якості фотокаталізаторів досліджувалось в роботах [6-11]. Встановлено, що на каталітичну активність впливає при-рода катіонів в октаедричних та тетраедричних позиціях.

Властивості плазмової обробки були використані для синтезу складних неорганічних сполук. Синтез феритів за допомогою КНП розглянуто в статті [12].

У даній роботі наводяться результати подальших досліджень в цьому напрямку.

Мета роботи

Метою дослідження було визначення кристалохімічних параметрів феритів кобальту зі структурою шпінелі в системі $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 \leq x \leq 1$), встановлення залежності структури і магнітних характеристик сполук від складу, що утворюються та визначення фотокаталітичної активності феритів кобальту у реакції розкладання 4 нітрофенолу (4-НФ).

Методика проведення експерименту

В якості прекурсорів використовувалися водні 0,5М розчини ферум(II) сульфату і кобальт(II) сульфату, 2 М розчин натрій гідроксиду. Підготовка нанорозмірного кобальтового фериту проводилася на лабораторній плазмовій хімічній установці, що

детально описана в роботі [12]. Склад синтезованих зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Склад синтезованих зразків

Номер зразка	1	2	3	4
x в формулі $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$	1.0	0.75	0.5	0.25
Хімічна формула	CoFe_2O_4	$\text{Co}_{0,75}\text{Fe}_{2,25}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,5}\text{Fe}_{2,5}\text{O}_4$	$\text{Co}_{0,25}\text{Fe}_{2,75}\text{O}_4$

Отриманий продукт промивали і сушили для подальшого дослідження. Фазовий склад і структуру зразків фериту вивчали з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-2 с Cu-K α випромінюванням. Дані рентгенофазового аналізу використовували для характеристики розміру частинок і морфології отриманих зразків. Магнітні властивості кінцевого порошку вивчалися з використанням вібраційного магнітометра.

Концентрацію 4-НФ визначали спектрофотометрично за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC. Вихідна концентрація 5мг/л.

Ступінь розкладання розраховували по зменшенню концентрації 4-НФ у водному розчині за формулою:

$$\chi = \frac{(C_0 - C_t) \cdot 100\%}{C_0}$$

де C_0 - початкова концентрація 4НФ в розчині; C_t - концентрація 4НФ в розчині в момент часу t.

Параметр кристалічної решітки, розмір кристалітів визначали, виходячи з експериментальних рентгенівських дифрактограм за методом Селякова-Шеррера.

Результати та їх обговорення

Рентгенограми, відповідні зразкам 1-4 з різним молярним співвідношенням x, мають дифракційні піки, що відповідають шпінелевим оксидним системам фериту кобальту (рис. 1). На рентгенограмах присутні всі основні характерні піки шпінелі (220), (311), (222), (400), (422), (511). Причому зі збільшенням вмісту кобальту дифракційні піки розширюються і інтенсивність їх зменшується, що пов'язано з присутністю кристалізаційної води.

Присутні також піки, відповідні Fe_3O_4 , для складів, збагачених катіонами ферума. Розрахунки основних кристалохімічних параметрів показали, що формування структури при вмісті ферума вище стехіометричного відбувається за типом формування маггеміта, про що свідчить значення параметра решітки. За стехіометричних складів формується структура оберненої шпінелі. У табл. 2 наведені результати рентгенофазового аналізу, де L_1 - розмір кристалітів, А; М - ступінь мікронапруг,%; D - щільність дислокацій, см⁻².

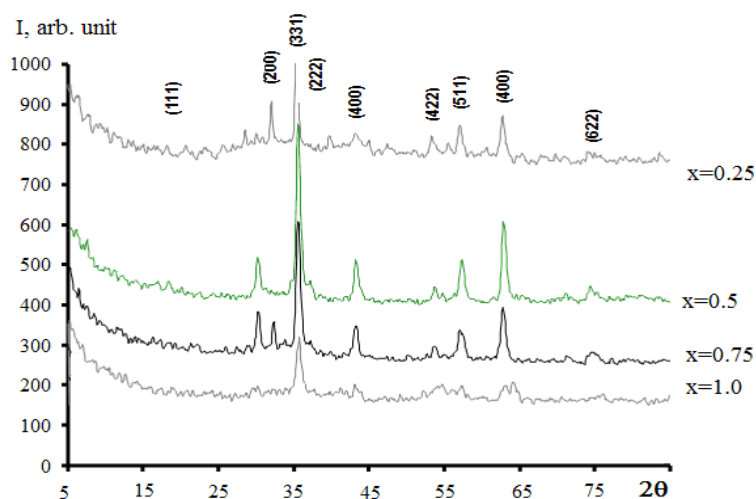


Рис. 1 – Дифрактограми зразків згідно табл. 1

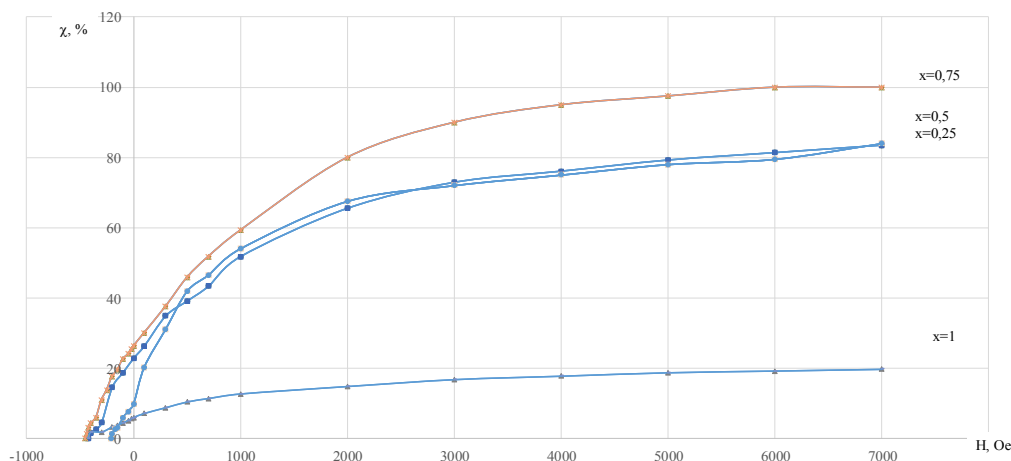


Рис. 2 – Криві намагніченості для зразків $Co_xFe_{3-x}O_4$ табл. 1

Синтезовані зразки мають схожу магнітну поведінку. Магнітні криві показують високу коерцитивну силу, обумовлену високою магнітною анізотропією фериту кобальту (для $x=1$). З підвищенням вмісту феруму, намагніченість насичення збільшується, а значення коерцитивної сили зменшується. Криві намагнічування зразків показані на рис. 2.

Кінетика розкладання 4-НФ в присутності феритів була досліджена з використанням УФ-спектроскопії та представлена на рис. 3. Водний розчин 4-НФ характеризується наявністю піка поглинання при 317 нм.

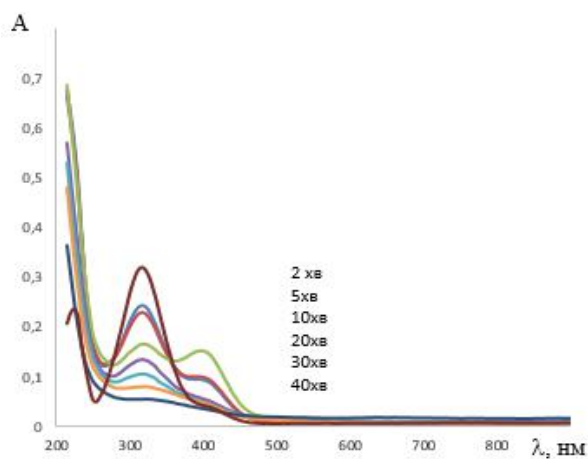


Рис. 3 – Кінетика розкладання 4-НФ (зразок 1)

Таблиця 2 – Результати рентгенофазового аналізу

x	a, нм	L_1 , А	M, %	D, cm^{-2}
0,25	0,83373	418	$4,66 \cdot 10^{-4}$	$40,55 \cdot 10^{10}$
0,5	0,83154	481	$526 \cdot 10^{-4}$	$30,5 \cdot 10^{10}$
0,75	0,83382	460	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$33,3 \cdot 10^{10}$
1,0	0,83401	350	$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{10}$

При розкладанні його відбувається послідовне згладжування піку, що вказує на утворення CO_2 і H_2O (рис. 3).

В результаті проведених експериментів було встановлено, що 4-НФ не розкладається самовільно без УФ-опромінення як в присутності каталізатора, так і при його відсутності. Руйнування молекул 4НФ відбувається в тих розчинах, які зазнали впливу УФ-випромінювання, але цей процес значно

прискорюється в присутності феритових каталізаторів $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 \leq x \leq 1$). Залежність ступеню розкладання 4-НФ від мольного співвідношення катіонів x в хімічній формулі носить зворотно пропорційну залежність, що зображено на рис. 4.

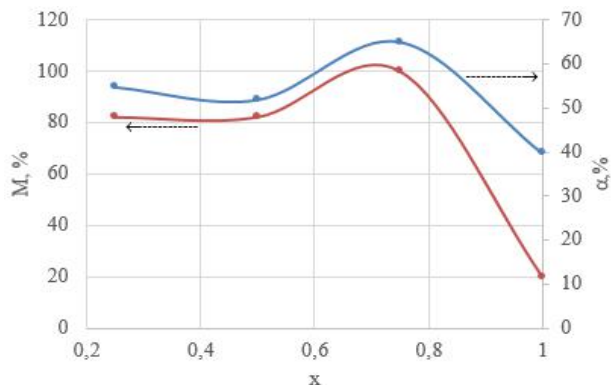


Рис. 4 – Залежність ступеня розкладання 4-НФ (час обробки 20 хвилин) та відносна намагніченість насичення зразків згідно таблиці 1

Висновок

Проведено порівняльне дослідження кобальтових феритів $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ з різним складом ($x = 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$), синтезованих за допомогою КНП. Композиції, відмінні від стехіометричних мають дефектну структуру, що підтверджується кристалохімічними розрахунками.

Середній розмір кристаліту обчислений з піків дифрактограм підтвердив діапазон розмірів 35–41,8 нм. Намагніченість насиченості зразків зростає зі зменшенням x . Максимальна коерцитивна сила відповідає стехіометричному складу. Вивчені фотокаталітичні властивості в реакції розкладання 4-НФ. Зі збільшенням мольного співвідношення катіонів ступінь розкладання 4-НФ зменшується.

Список літератури

1. 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.
2. Thanigai, Arul K. 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.
3. Ren, B. Ferrites as Photocatalysts for Water Splitting and Degradation of Contaminants / B. Ren et al. // *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*. – 2016. – P. 79-112. – doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
4. Ibrahim, I. Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite (MFe_2O_4 , M= Zn, Co, Mn) nanocrystals engineered by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction. / I. Ibrahim, I. O. Ali, T. M. Salama, A. A. Bahgat, M. M. Mohamed // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2016. - Vol. 181. – P. 389-402. – doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.

References (transliterated)

1. 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.
2. 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.
3. 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*, 2016, 79-112, doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
4. Ibrahim, I., Ali, I. O., Salama, T. M., Bahgat, A. A., Mohamed, M. M. Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite (MFe_2O_4 , M = Zn, Co, Mn) nanocrystals 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 FeCo_2O_4 and CoFe_2O_4 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. *Cryst. Eng. Comm.* 2019, **21**(10), 1579-1586, doi: 10.1039/C8CE01631C.
7. **Zhao, K. et al.** Enhanced organic pollutants degradation and electricity production simultaneously via strengthening the radicals reaction in a novel Fenton-photocatalytic fuel cell system. *Water research*, 2017, **108**, 293-300, doi: 10.1016/j.watres.2016.11.002.
8. **Wang, C., Liu H., Sun Z.** Heterogeneous photo-Fenton reaction catalyzed by nanosized iron oxides for water treatment // *International Journal of Photoenergy*, 2012, Article ID 801694, doi: 10.1155/2012/801694.
9. **Ren, Y., Lin, L., Ma, J., Yang, J., Feng, J., Fan, Z.** Sulfate radicals induced from peroxymonosulfate by magnetic ferrous spinel MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{and Zn}$) as heterogeneous catalysts in the water. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, **165**, 572-578, doi: 10.1016/j.apcatb.2014.10.051.
10. **Xiong, Z. et al.** Degradation of p-nitrophenol (PNP) in aqueous solution by a micro-size FeO/O_3 process (mFeO/O_3): Optimization, kinetic, performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **302**, 137-145, doi: 10.1016/j.cej.2016.05.052.
11. **Zhu, Z., Liu, F., Zhang, H., Zhang, J., Han, L.** Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol over $\text{Ag}/\text{MFe}_2\text{O}_4$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Zn}, \text{Cu}, \text{and Ni}$) prepared by a modified chemical co-precipitation method: a comparative study. *Rsc Advances*, 2015, **5**(68), 55499-55512, doi: 10.1039/C5RA04608D.
12. **Frolova, L., Derhachov, M.** The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 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 технології 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. Фотокаталітична активність шпінельних феритів $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), отриманих під дією контактної низькотемпературної нерівноважної плазми / **Л. А. Фролова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 100-104. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.11.

Please cite this article as:

Frolova, L. Photocatalytic activity of spinel ferrites $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$) obtained by treatment contact low-temperature nonequilibrium plasma. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **1**, 100-104, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Фролова, Л. А. Фотокаталитическая активность шпинельных ферритов $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), полученных под действием контактной низкотемпературной неравновесной плазмы / **Л. А. Фролова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 100-104. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.11.

АННОТАЦІЯ Інтерес дослідників к системі $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ значительно вырос за последние десятилетия. Это связано с использованием ферритов кобальта для изготовления высокочастотных устройств, в магнитно-резонансной томографии, биотехнологии вследствие высокой магнитокристаллической анизотропии, высокой коэрцитивности и умеренной насыщенности намагниченности, способности уменьшать магнитные потери на высоких частотах. Одним из способов улучшения магнитных свойств ферритовых порошков является регулирование структуры исходного материала. Гидрофазные методы синтеза, в том числе инновационные, являются основой для создания перспективных и высокотехнологичных ферритовых материалов. Поэтому закономерности их формирования являются объектом всестороннего изучения. Особенность гидрофазного синтеза заключается в том, что он позволяет обеспечить высокую стехиометрию и однородность конечного продукта, более низкие температуры синтеза, чем при твердофазном) и сравнительно простое и доступное оборудование. Целью исследования было определение кристаллохимических параметров ферритов кобальта со структурой шпинели в системе $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), установление зависимости структуры и магнитных характеристик образующихся соединений от состава, и определение фотокаталитической активности ферритов кобальта в реакции разложения 4-нитрофенола. Сравнительное исследование кобальтовых ферритов $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ с разным составом ($x = 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$), синтезированных с помощью контактної низькотемпературної нерівноважної плазми показало, що композиції, отличные от стехиометрических имеют дефектную структуру. Средний размер кристаллита рассчитанный из пиков дифрактограмм подтвердил диапазон размеров 35,0 -41,8 нм. Намагниченность насыщенности образцов возрастает с уменьшением мольного соотношения катионов. Максимальная коэрцитивная сила соответствует стехиометрическому составу. Изучены фотокаталитические свойства в реакции разложения 4 нитрофенола. С увеличением содержания кобальта степень разложения 4-нитрофенола уменьшается.

Ключевые слова: феррит кобальта; магнитная наночастицы; рентгеновская дифракция; УФ-спектры, коэрцитивность, намагниченность

Поступила (received) 01.09.2019

УДК 004.942:615.224: 678.016

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.12

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ IN VIVO ИОНИЗИРУЕМЫХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ИЗ МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТАБЛЕТОК НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

А. А. ЧЕРНЫЙ^{1*}, С. А. КОНДРАТОВ², Р. П. САВЯК¹

¹ отдел экспериментальной разработки, ООО НПФ "Микрохим", Рубежное, УКРАИНА

² кафедра высшей математики и компьютерной технологии, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, Рубежное, УКРАИНА

*e-mail: chornyi@microkhim.com

АННОТАЦИЯ Проведено исследование кинетики высвобождения 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината из таблеток пролонгированного действия, полученных с использованием полимеров гидроксипропилметилцеллюлозы марок К4М, К15М, К100М и К200М. Проверено гипотезу о возможности принятия для выборок нормального распределения отклика – степени высвобождения препарата. Выявлено слабое влияние природы полимера на кинетику высвобождения – максимальная относительная разность между средними значениями для каждого полимера не превышает 15 %. Проведена серия экспериментальных исследований в буферных растворах при pH 1,2; 4,5 и 6,8 для выявления влияния pH на кинетику высвобождения. Выявлено существенное влияние pH на скорость высвобождения – при pH 1,2 наблюдается более быстрое высвобождение. Кривые растворения при pH 4,5 и 6,8 практически совпадают. На примере субстанции 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината разработана математическая модель кинетики высвобождения in vivo, отражающая влияние pH среды на скорость высвобождения из матричных таблеток лекарственных препаратов, ионизированных в водных средах. Модель основана на статистическом исследовании данных кинетики высвобождения in vitro при pH 1,2; 4,5; 6,8, с последующим построением на их основе кубических сплайнов для усредненных кривых и выявлением наличия влияния pH. Эти данные используются на стадии моделирования in vivo с учетом степени высвобождения при pH на участке ЖКТ, предшествующим текущему. Условием применения модели является наличие нормального распределения погрешностей измерений in vitro с одинаковой дисперсией, не зависящей от pH. Значение дисперсии используется для моделирования границ профиля растворения методом Монте-Карло. Разработана процедура оценки верхних и нижних границ профилей высвобождения в организме методом Монте-Карло путем генерирования значений высвобождения для 100 испытаний на основе разработанной модели кинетики высвобождения. Модель использована при разработке и промышленном внедрении рецептуры матричных таблеток пролонгированной формы 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината (торговое название «Армадин») в ООО «Микрохим».

Ключевые слова: 2-этил-3-метил-6-гидроксиметилпиридина сукцинат; матричные таблетки; гранулы; статистический анализ; кинетика высвобождения; математическое моделирование in vivo

DEVELOPMENT OF THE RECIPE FOR MATRIX COMPOSITIONS OF 2-ETHYL-3-METHYL-6-HYDROXYMETHYLPYRIDINE SUCCINATE FOR TABLETS OF PROLONGED ACTION BASED ON POLYMERIC BONDING

А. А. ЧОРНИЙ¹, С. А. КОНДРАТОВ², Р. П. САВЯК¹

¹ Experimental development department, Research and Production Company "Microkhim", Rubizhne, UKRAINE

² Department of mathematics and computer technologies, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Rubizhne, UKRAINE

ABSTRACT The kinetics of the release of 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxypyridine succinate from extended-release tablets obtained using K4M, K15M, K100M and K200M hydroxypropyl methylcellulose polymers was studied. The hypothesis about the possibility of accepting for the samples the normal distribution of response - the degree of release of the drug was tested. A weak effect of the nature of the polymer on the kinetics of release was revealed — the maximum relative difference between the average values for each polymer does not exceed 15%. A series of experimental studies in buffer solutions at pH 1.2; 4.5 and 6.8 to identify the effect of pH on the kinetics of release. A significant effect of pH on the release rate was revealed - at pH 1.2 a faster release is observed. Dissolution curves at pH 4.5 and 6.8 practically coincide. Using the substance of 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxypyridine succinate as an example, a mathematical model of the kinetics of in vivo release has been developed, which reflects the effect of pH on the rate of release of ionized drugs from matrix tablets in aqueous media. The model is based on a statistical study of in vitro release kinetics data at pH 1.2; 4.5; 6.8, with the subsequent construction on their basis of cubic splines for the averaged curves and revealing the presence of the influence of pH. These data are used at the in vivo modeling stage, taking into account the degree of release at pH in the gastrointestinal tract preceding the current one. A condition for the application of the model is the presence of a normal distribution of in vitro measurement errors with the same dispersion, independent of pH. The dispersion value is used to model the boundaries of the dissolution profile using the Monte Carlo method. A procedure has been developed for assessing the upper and lower boundaries of release profiles in the body by the Monte Carlo method by generating release values for 100 trials based on the

developed release kinetics model. The model was used in the development and industrial implementation of the formulation of matrix tablets of a prolonged form of 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxypyridine succinate (trade name "Armadin") in LLC "Mikrokhim".

Keywords: 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxymethylpyridine succinate; matrix tablets; granules; statistical analysis; release kinetics; math modeling in vivo

Введение

В ранней публикации [1], на основе данных по кинетике высвобождения изосорбида динитрата (ИСДН) *in vivo*, разработана математическая модель высвобождения этого препарата *in vitro*, использованная для разработки пролонгированной формы с заданным профилем высвобождения. ИСДН, как лекарственная субстанция, является нейтральным веществом, которое не ионизируется в водных растворах. Это приводит к тому, что кинетика высвобождения не зависит от pH, что существенно облегчает создание модели высвобождения [1]. В то же время значительное количество субстанций препаратов – это ионизируемые соединения, обычно соли неорганических или карбоновых кислот. Поэтому возникают вопросы, связанные с влиянием природы полимеров и pH среды на кинетику высвобождения ионизируемых субстанций, их влияние на математическую модель высвобождения *in vivo* и подходы к созданию на их основе полимерно-лекарственных композиций пролонгированного действия с заданным профилем высвобождения.

Одним из лекарственных препаратов такого типа является 2-этил-3-метил-4-гидроксипиридина сукцинат (ЭМГПС, рис. 1). Он используется как ингибитор свободнорадикальных процессов и мембранопротектор, обладающий антигипоксическим, стресспротекторным, ноотропным, противозлептическим и анксиолитическим действием [2-4]. Препарат быстро всасывается при приеме внутрь: полупериод абсорбции составляет 0,08-1 ч.

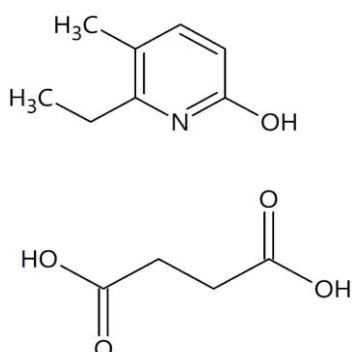


Рис. 1 – Структурная формула 2-этил-3-метил-4-гидроксипиридина сукцината

В связи с быстрым всасыванием и выведением препарата актуальная практическая задача – разработка на основе ЭМГПС лекарственных таблетированных препаратов пролонгированного действия, которые обеспечивали бы длительный терапевтический эффект при приеме внутрь. В частности, необходимо было создать рецептуру, в

которой высвобождение за 8-10 часов в желудочно-кишечном тракте составило бы порядка 80-95 % от содержания препарата в таблетке. Этим свойствам могут удовлетворять матричные таблетки пролонгированного действия.

На современном этапе пролонгирование является действенным методом повышения эффективности лекарственных препаратов. Обычные препараты часто требуют многократного введения, что сопровождается перепадами концентрации лекарства в крови, что небезразлично организму. Пролонгированные препараты достигают терапевтического эффекта при уменьшении кратности приема, в значит – снижения токсичности и риска побочных эффектов [5,6]. Для модификации высвобождения уже несколько десятилетий применяются матричные лекарственные формы (МЛФ): таблетки, пеллеты, микрогранулы и т. д. [6]. В МЛФ лекарственное вещество, вместе со вспомогательными веществами, равномерно распределено в объеме матрицы – полимерного геля или пленки [7].

В настоящее время среди препаратов химико-фармацевтической промышленности с модифицированным высвобождением более половины приходится на МЛФ [6]. Причина этого заключается в том, что в производстве МЛФ не требуется сложного специфического оборудования и применения дорогостоящих технологических процессов, а с помощью современных вспомогательных веществ удается задавать желаемые характеристики высвобождения фармацевтических субстанций из матриц [6]. Наиболее часто в качестве матричного связующего применяют продукты модификации целлюлозы, в первую очередь – гидроксиметилпропилцеллюлозу (ГПМЦ) [8]. Считается [6], что создание новых МЛФ, которые можно рассматривать как специфические полимерные композитные материалы – один из самых экономичных путей разработки и производства инновационных лекарственных препаратов [6].

Современные технологи создания МЛФ опираются на математические модели кинетики высвобождения, которые создаются на основе экспериментальных данных для каждого препарата, получаемые *in vitro* в ходе лабораторных исследований. Эти модели можно разделить условно на 2 группы: теоретические и эмпирические [1,8-11]. Теоретические модели опираются различные физические модели высвобождения различных степеней сложности [9]. Недостатком большинства таких моделей является их неуниверсальность и наличие значительного числа параметров, которые не всегда возможно определить экспериментально. Поэтому широкое распространение получили

эмпирические модели, основанные на статистических методах и регрессионном анализе [9, 10]. Широкому распространению таких моделей способствует внедрение в фармацевтическую практику единой методологии исследований высвобождения, основанной на исчерпывающем по времени изучении кинетики высвобождения в трех средах, имитирующих среды ЖКТ и многократному дублированию наблюдений в каждой точке [12]. Это позволяет получать однотипные таблицы данных, которые можно однотипно обрабатывать. При этом возникает проблема моделирования высвобождения препаратов в организме (*in vivo*) по данным *in vitro*. В [11] предложен подход к решению этой задачи, основанный на методе бутстрепа (моделирования выборок) и имитационного моделирования высвобождения в последовательных зонах ЖКТ с учетом высвобождения в предыдущих зонах. Метод позволяет получать эмпирические функции распределения высвобождения препарата при разных значениях времени пребывания таблеток в ЖКТ [11]. В работе [1] предложен статистический метод оценки высвобождения *in vivo*, основанный на нормальном распределении погрешностей и независимости скорости высвобождения *in vitro* от pH, что характерно для недиссоциируемых субстанций.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка на примере 2-этил-3-метил-6-гидрокси-3-метилпиридина сукцината, математической модели высвобождения *in vivo* для матричных композиционных таблеток на основе субстанций, ионизированных в водных растворах, и полимерных связующих – производных целлюлозы. Для этих субстанций можно ожидать наличия зависимости скорости высвобождения от pH среды.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

- на основе исследования кинетики высвобождения с помощью статистического анализа выбрать подходящий вариант полимерного матричного связующего из числа производных целлюлозы, разрешенных к использованию в медицине;
- разработать математическую модель высвобождения *in vitro*, исследовать ее статистические свойства;
- на основании этой модели разработать модель высвобождения *in vivo* и визуализировать доверительные пределы степени высвобождения.

Экспериментальная часть

Исходные вещества. В работе использовали:

- 2-этил-3-метил-6-гидрокси-3-метилпиридина сукцинат производства ООО НПФ "Микрохим", Украина,

- гидроксипропилметилцеллюлозу марки Benecel K4M, K15M, K100M и K200M, производства Ashland, США,

- инертные компоненты: гипромеллозу Mantrocel E6 (Mantrose-Haeser, США) и магния стеарат (Испания).

Все компоненты были фармакопейного качества.

Гранулирование таблетмассы. Готовили водный раствор ГПМЦ E6 концентрацией 5 % масс. Этим раствором увлажняли смесь ЭМГПС и высокомолекулярной ГПМЦ (K4M...K200M) в смесителе Kenwood KM070. Увлажненную смесь перемешивали в течение 20 минут и гранулировали в грануляторе НГ-12 с диаметром отверстий 1,5 мм. Полученные гранулы сушили в сушильном шкафу СП-100С при 30°C в течение 8 часов до постоянной массы.

Получение таблеток. Гранулы после сушки смешивали со стеаратом магния (0,5 % масс.) и прессовали в двояковыпуклые таблетки на гидравлическом прессе ППР-10 при давлении 100 атм. Диаметр таблеток 12 мм, масса таблеток 715 мг (± 18 мг), содержание действующего вещества 500 мг.

Изучение кинетики высвобождения 2-этил-3-метил-6-гидрокси-3-метилпиридина сукцината из таблеток проводили по методике теста «Растворение» в соответствии с требованиями Государственной Фармакопеи Украины [12]. Исследования проводили в аппарате Pharma Test PT DT-70, перемешивающее устройство – лопасть, 75 об/мин. Среда растворения – стандартные водные буферные растворы с pH 1,2; 4,5; 6,8. Объем среды 900 мл. Количество ЭМГПС, перешедшее в раствор, определяли методом ВЭЖХ, хроматограф SHIMADZU LC-2010 СНТ с УФ-детектором, колонка Zorbax Bonus RP 4,6 мм \times 150 мм \times 5 мкм, подвижная фаза: смесь метанол (10 % об.) – натрия дигидрофосфат дигидрат, 0,1 М р-р (90 % об.).

Изложение основного материала

Выбор полимера. На первом этапе провели сравнительные исследования кинетики высвобождения препарата из таблеток, полученных с использованием 4 типов полимеров, представленных выше. Поскольку наибольшее время пребывания таблеток приходится всегда на толстый кишечник, исследования проводили при pH 6,8, что имитирует среду этого раздела ЖКТ.

Сначала проверили статистическую гипотезу о том, можно ли принять для каждой временной выборки из 6 параллельных наблюдений нормальное распределение отклика – степени высвобождения препарата. Для проверки использовали критерий Шапиро-Уилка, который является наиболее мощным для проверки гипотезы нормальности [13]. Расчеты проводили с помощью пакета статистических вычислений Statistica 10 на уровне значимости 0,05. В результате проведения расчетов было установлено,

что расчетное значение критерия Шапиро-Уилка во всех случаях было больше критического (0,788 для $n = 6$ [13]). Это позволяет принять гипотезу о нормальном распределении выборок и далее использовать аппарат параметрического статистического анализа, связанного с этим распределением. Для выявления влияния природы полимера использовали одномерный факторный анализ [14]. Проверяемым фактором был тип полимера, а откликом – результаты параллельных определений степени высвобождения в течение 1-14 часов. Расчеты проводили в среде MS Excel, используя надстройку «Анализ данных». Для всех значений времени влияние фактора «Природа

полимера» оказалось значимым: расчетные значения критерия Фишера (F) – отношения межгрупповой и внутригрупповой дисперсий во всех случаях оказались значительно больше табличного значения критерия для уровня значимости 0,05 (3,10) (табл. 1). Вместе с тем влияние природы связующего на кинетику высвобождения препарата оказывается достаточно слабым: максимальная относительная разность между средними значениями для каждого полимера не превышает 15 %. Поэтому, в первом приближении, можно считать, что марка ГПМЦ не влияет на кинетику высвобождения. В дальнейших экспериментах использовали ГПМЦ марки К15.

Таблица 1 – Кинетика высвобождения ЭМГПС (в процентах от содержания в таблетках) в зависимости от природы полимерного связующего и расчетные значения критерия Фишера для факторного анализа

t, час	Марка ГПМЦ	Результаты параллельных измерений						F
		1	2	3	4	5	6	
1	К-15	18,25	18,77	18,5	18,57	18,42	18,53	277,6
	К-200	16,75	16,68	16,52	16,78	16,81	17	
	К-100	19,02	18,78	18,82	18,5	18,75	18,67	
	К-6	19,53	19,5	19,41	19,78	19,57	19,23	
3	К-15	39,25	40,28	40,04	39,65	40,23	39,73	249,1
	К-200	37,2	37,38	36,47	36,92	36,84	37,43	
	К-100	38,81	38,28	38,2	37,81	38,58	38,76	
	К-6	42,8	43,13	43,33	43,39	42,71	42,28	
5	К-15	55,59	50,54	52,13	55,25	53,49	52,37	23,8
	К-200	49,15	50,43	51,41	49,38	50,95	48,97	
	К-100	50,24	50,34	51,85	51,44	50,11	51,42	
	К-6	55,94	55,68	55,14	53,99	56,02	56,38	
8	К-15	68,67	67,03	67,09	67,36	67,71	67,18	187,5
	К-200	62,77	63,35	64,24	62,85	63,02	62,71	
	К-100	65,76	65,91	66,08	67,37	65,82	66,43	
	К-6	71,13	71,03	71,69	70,97	71,32	72,7	
10	К-15	76,99	72,65	72,81	74,48	73,37	73,23	29,1
	К-200	69,89	70,43	73,91	70,3	71,5	69,74	
	К-100	72,19	72,76	72,99	74,45	72,35	72,9	
	К-6	77,62	77,17	77,77	77	78,94	80,6	
12	К-15	83,64	80,14	81,46	80,55	81,44	80,28	48,9
	К-200	80,88	80,86	83,05	79,71	79,98	79,57	
	К-100	77,7	77,84	78,1	81,1	78,98	78,96	
	К-6	85,89	87,16	87,14	85,74	86,18	87,49	
14	К-15	88,65	86,59	87,91	86,9	87,78	88,33	79,5
	К-200	87,03	86,9	87,76	87,44	86,03	85,72	
	К-100	85,72	87,44	86,03	87,76	87,03	86,9	
	К-6	93,62	93,18	93,04	91,78	92,11	93,96	

Влияние pH среды на кинетику высвобождения

Для выявления влияния pH на кинетику высвобождения проведена серия экспериментальных исследований в буферных растворах при pH 1,2; 4,5 и 6,8, имитирующих кислотность среды, соответственно, в желудке, тонком и толстом кишечнике. Результаты представлены в табл. 3. Исследование данных табл. 3 с помощью критерия Шапиро-Уилка показало, что для всех выборок при одинаковых значениях времени, кроме одной, расчетное значение критерия W оказывается большим

критического (0,788) [13]. Это свидетельствует, что данные можно описать в рамках нормального (гауссовского) распределения. Это позволило использовать факторный анализ для решения вопроса о влиянии величины pH на среднее значение высвобождения в каждый момент времени. Как следует из данных, приведенных ниже, при $\alpha=0,05$ расчетные значения F-критерия Фишера (отношения межгрупповой и внутригрупповой дисперсий) во всех точках времени значительно превышают критическое табличное значение $F_{табл} = 3,68$.

Таблица 2 - Расчетные значение F–критерия Фишера

<i>t, час</i>	1	3	5	8	10	12	14
<i>F_{выч}</i>	34,0	34,3	35,7	63,7	86,5	98,3	78,7

Эти результаты свидетельствует, что влияние pH на скорость высвобождения является существенным и должно быть учтено в модели *in vitro*.

Как следует из табл. 3, существенно более высокая скорость высвобождения наблюдается при pH 1,2, а кривые растворения при pH 4,5 и 6,8 практически совпадают. Это может свидетельствовать, что скорость высвобождения связана с эффектами протонирования. Пиридиновый атом азота субстанции (рК_в ~ 9) является слабоосновным и будет полностью протонироваться только в сильнокислой среде (pH 1,2). В слабокислой (pH 4,5) и нейтральной (pH 6,8) средах протонирования практически не происходит, и высвобождается только непротонированная форма.

Учитывая, что данные возможно описать с помощью нормального распределения, проведена проверка однородности дисперсий по каждой серии наблюдений по критерию Кохрена (отношению максимальной дисперсии *n* нормально

Таблица 3 – Кинетика высвобождения ЭМГПС (в % от содержания) из матричных таблеток в зависимости от pH. \bar{x} – среднее значение, S^2 – дисперсия.

pH	<i>t, час</i>	Результаты параллельных измерений						–	S^2
		1	2	3	4	5	6		
1,2	1	19,2	22,0	20,3	20,5	21,1	21,8	20,8	1,060
	3	41,8	47,2	45,3	44,6	44,7	46,9	45,1	3,768
	5	57,4	60,9	59,5	59,1	59,5	60,8	59,6	1,649
	8	76,6	84,5	77,9	79,4	77,2	77,6	78,8	8,550
	10	85,5	89,7	87,2	86,1	88,0	85,6	87,0	2,712
	12	91,6	99,7	97,7	98,7	94,9	94,2	96,1	9,502
	14	95,0	99,6	96,1	97,8	96,2	98,7	97,2	3,120
4,5	1	15,5	18,0	17,4	15,9	17,6	17,0	16,9	0,979
	3	36,1	39,8	39,5	39,4	36,9	39,3	38,5	2,434
	5	46,7	52,9	50,0	52,2	47,6	51,2	50,1	6,269
	8	64,8	70,5	66,0	65,1	67,0	66,0	66,6	4,271
	10	70,8	77,4	74,8	76,9	75,4	74,1	74,9	5,686
	14	82,2	88,2	87,9	85,8	85,0	84,2	85,5	5,093
6,8	1	18,3	18,8	18,5	18,6	18,4	18,5	18,5	0,029
	3	39,3	40,3	40,0	39,7	40,2	39,7	39,9	0,156
	5	55,6	50,5	52,1	55,3	53,5	52,4	53,2	3,781
	8	68,7	67,0	67,1	67,4	67,7	67,2	67,5	0,385
	10	77,0	72,7	72,8	74,5	73,4	73,2	73,9	2,672
	12	83,6	80,1	81,5	80,6	81,4	80,3	81,3	1,691
	14	88,7	86,6	87,9	86,9	87,8	88,3	87,7	0,644

Моделирование высвобождения *in vivo*

Поскольку высвобождение ЭМГПС является pH-зависимым, кинетические кривые при постоянных значениях pH не отражают в полной мере высвобождение препарата в организме. Поэтому была разработана и исследована численная модель высвобождения ЭМГПС *in vitro* на основе данных *in vitro*, которая отражала бы влияние pH среды на

распределенных выборок одинакового объема *m* к сумме дисперсий выборок) [13,15]:

$$G_{\text{выч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \quad (1)$$

Для данных табл. 2 выполняется условие:

$$G_{\text{выч}} = 0,137 < G_{\text{таб}}(\alpha; m-1; n) = G_{\text{таб}}(0,05; 5; 21) = 0,342$$

$$t_{\text{ж}} + t_{\text{тк}} > t_i > t_{\text{ж}}$$

$$x_{\text{ж}} = x(t_{\text{ж}}) \quad t_{\text{тк}}^0 \quad x_{\text{ж}} \quad (2)$$

$$\Delta t_1 = t_{\text{тк}}^0 - t_{\text{ж}} \quad t_i > t_{\text{тк}} + t_{\text{ж}} \quad t_i + \Delta t_2 \quad x_{\text{тк}} = x(t_{\text{тк}} + \Delta t_1)$$

$$t_{\text{тол}}^0 \quad x_{\text{тк}} \quad \Delta t_2 = t_{\text{тол}}^0 - t_{\text{тк}} - t_{\text{ж}}$$

$$y_{i,\text{выч}} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

В соответствие с [15] это означает, что дисперсии всех выборок можно считать одинаковыми. Пересчет данных табл. 1 для объединенной выборки дает усредненную дисперсию $\bar{S}^2 = 3,302$ и среднеквадратичное отклонение: $\bar{S} = \sqrt{3,302} = 1,82$.

1. Исходные данные – массивы средних значений высвобождения для каждого значения времени при pH 1,2; 4,5; 6,8, то есть, усредненных кривых высвобождения *in vitro* для каждого значения pH. Эти значения интерполировали кубическими сплайнами.

2. Задавали границы изменения времени пребывания препарата в различных участках ЖКТ: желудок: 0,5–1 час, тонкий кишечник: 3–5 час, суммарное нахождение в ЖКТ: 14 час. Время пребывания в желудке ($t_{ж}$) и тонком кишечнике ($t_{тк}$) генерировали, как случайные величины, равномерно распределенные между приведенными границами

3. Для моделирования отдельного профиля высвобождения генерировали серию значений времени (0-14 час с шагом 0,5). Для каждого значения времени t_i проводили следующие вычисления:

а) при $t_i < t_{ж}$ рассчитывали по сплайну для pH 1,2 степень высвобождения x_i ;

б) при $t_{ж} + t_{тк} > t_i > t_{ж}$ рассчитывали по сплайну для pH 1,2 конечную степень высвобождения в желудке: $x_{ж} = x(t_{ж})$. Далее по сплайну для pH 4,5 находим значение времени ($t_{тк}^0$), при котором степень высвобождения составляет $x_{ж}$. Исходя из этого значения рассчитывали поправку по времени для расчета высвобождения в тонком кишечнике с учетом высвобождения в желудке:

$$\Delta t_1 = t_{тк}^0 - t_{ж} \quad (3)$$

Далее при выполнении условия б) рассчитывали значения степени высвобождения x_i по сплайну для pH 4,5 для значения времени $t_i + \Delta t_1$;

в) при $t_i > t_{тк} + t_{ж}$ рассчитывали по сплайну для pH 4,5 конечную степень высвобождения в тонком кишечнике: $x_{тк} = x(t_{тк} + \Delta t_1)$. Далее по сплайну для pH 6,8 находим значение времени ($t_{тол}^0$), при котором степень высвобождения составляет $x_{тк}$. Исходя из этого значения рассчитывали поправку по времени для расчета высвобождения в тонком кишечнике с учетом высвобождения в желудке и тонком кишечнике:

$$\Delta t_2 = t_{тол}^0 - t_{тк} - t_{ж} \quad (4)$$

Далее рассчитывали значения степени высвобождения x_i по сплайну для pH 6,8 для значения времени $t_i + \Delta t_2$, вплоть до последнего значения времени;

г) после получения всего массива значений x_i к ним (кроме $x_1=0$) добавили поправку, представляющую собой нормально распределенную случайную величину со средним значением, равным 0 и стандартным отклонением, равным заданному значению (1,8)

Рассмотренный алгоритм реализован в среде пакета прикладной математики Scilab. Генерацию

профилей проводили 100-1000 раз. Соединяя соседние точки прямыми, получили графический образ граничных значений высвобождения *in vivo* (рис. 2).

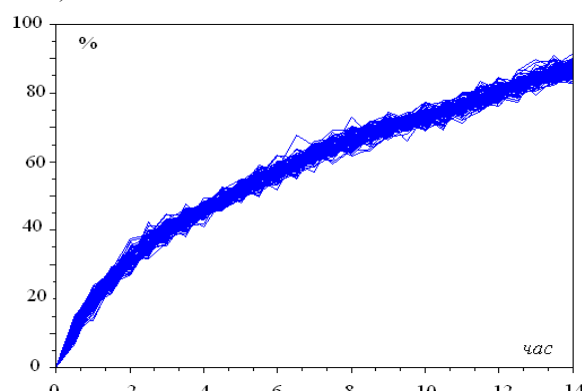


Рис. 2 – Графический образ граничных значений высвобождения для числа испытаний $n = 100$

Для более точной объективной оценки распределения степени высвобождения были получены эмпирические функции распределения в каждой временной точке и исследован их характер. Методом номограмм [15] было проверено, можно ли распределение данных считать нормальным. Для этого каждый набор из $n = 100$ значений степени высвобождения упорядочивали по возрастанию. Для набора рассчитали среднее значение (\bar{x}) и среднеквадратическое отклонение (σ). Каждому значению x_i приписывали вероятность $(i-0,5)/n$. Для каждого значения x_i рассчитывали нормированное значение:

$$y_{i, \text{выч}} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (5)$$

Для каждого значения вероятности рассчитывали значение обратной функции стандартного нормального распределения $y_{\text{теор}}$ с помощью функции Excel НОРМ.СТ.ОБР()

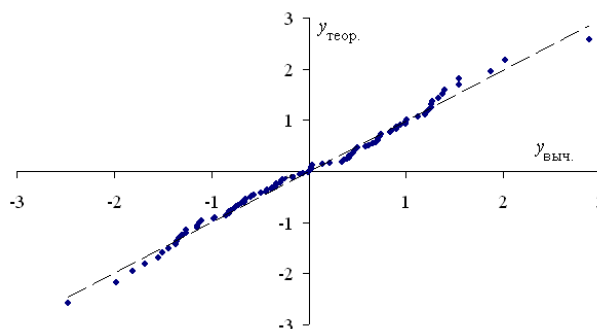


Рис. 3 – Зависимость $y_{\text{теор}}$ от $y_{\text{выч}}$ для статистического моделирования степени высвобождения для $t=13$ час

Как следует из рис. 3, точки зависимости $y_{\text{теор}}$ от $y_{\text{выч}}$ хорошо ложатся на прямую $y_{\text{теор}}=0,994y_{\text{выч}}$ с угловым коэффициентом, очень близким к 1. Коэффициент детерминации (0,99) также близок к 1. Такие зависимости наблюдались для всех временных точек. Это свидетельствует, что в каждой точке

времени высвобождение *in vivo* можно описать нормальным распределением [16]. Стандартные отклонения в каждой временной точке практически одинаковы и составляют 1,7-1,9 % (табл. 4). Для получения оценок верхней и нижней границ высвобождения приняли, что среднеквадратическое отклонение имеет верхнюю границу 2. Тогда для нормального распределения можно построить 95%-ный доверительный интервал, полудлина которого равна $\pm 1,96 \pm \approx \sigma 2 \pm = \sigma 4\%$. Значения границ приведены в табл. 3. Как следует из этих данных, проектируемые значения степени высвобождения находятся внутри заданного интервала высвобождения, представленного выше.

Обсуждение результатов

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что статистический подход к описанию высвобождения *in vivo*, разработанный ранее [1] для неионизируемых субстанций, можно, после некоторого модифицирования, использовать для субстанций, которые ионизируются в водных растворах. Модифицирование заключается в учете влияния pH путем последовательного введения

поправок на растворимость в средах, предшествующих текущей. Для получения этих поправок используется сплайн-аппроксимация усредненной кривой высвобождения *in vitro* при заданных значениях pH по всему диапазону времени. Условием использования этого метода является наличие нормального распределения погрешностей степени высвобождения и их одинаковой дисперсии (однородность по Кохрену) при разных pH. Это позволяет моделировать методом Монте-Карло верхние и нижние границы профилей высвобождения *in vivo* по данным *in vitro*.

На сегодняшний день математическое моделирование – это единственно возможный метод изучения высвобождения препаратов в организме. Поэтому рассмотренный подход можно рассматривать, как полезный с точки зрения методологии исследований комбинированных лекарственных препаратов. На основании результатов приведенных исследований, в частности, была разработана рецептура таблеток пролонгированной формы 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината (торговое наименование «Армадин»), налажено промышленное производство этого препарата в ООО НПФ "Микрохим" (г. Рубежное, Украина).

Таблица 4 – Средние значения (\bar{x} , %), стандартные отклонения (σ) и границы высвобождения ЭМГПС

t, час	\bar{x}	σ	Границы		t, час	\bar{x}	σ	Границы	
			нижн.	верх.				нижн.	верх.
0,5	11,3	1,83	7,3	15,3	7,5	64,4	1,82	60,4	68,4
1	19,8	1,94	15,8	23,8	8	66,4	1,84	62,4	70,4
1,5	26,1	1,78	22,1	30,1	8,5	68,3	1,81	64,3	72,3
2	31,5	1,82	27,5	35,5	9	69,9	1,73	65,9	73,9
2,5	36,2	1,85	32,2	40,2	9,5	71,4	1,88	67,4	75,4
3	40	1,85	36	44	10	72,9	1,84	68,9	76,9
3,5	43,2	1,8	39,2	47,2	10,5	74,6	1,89	70,6	78,6
4	46,2	1,74	42,2	50,2	11	76,4	1,88	72,4	80,4
4,5	48,8	1,87	44,8	52,8	11,5	78,3	1,78	74,3	82,3
5	51,5	1,93	47,5	55,5	12	80,2	1,8	76,2	84,2
5,5	54,4	1,85	50,4	58,4	12,5	82	1,9	78	86
6	57,2	1,85	53,2	61,2	13	83,9	1,86	79,9	87,9
6,5	59,9	1,88	55,9	63,9	13,5	85,5	1,79	81,5	89,5
7	62,2	1,89	58,2	66,2	14	87	1,8	83	91

Выводы

На примере субстанции 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината разработана математическая модель кинетики высвобождения *in vivo* лекарственных препаратов, ионизированных в водных средах, из матричных таблеток, позволяющая оценивать верхние и нижние границы профилей высвобождения в организме.

Модель основана на статистическом исследовании данных кинетики высвобождения *in vitro* при pH 1,2; 4,5; 6,8, с последующим построением на их основе сплайнов для усредненных кривых и выявлением наличия влияния pH. Эти данные

используются на стадии моделирования *in vivo* с учетом степени высвобождения при pH на участке ЖКТ, предшествующим текущему.

Условием применения модели является наличие нормального распределения погрешностей измерений *in vitro* с одинаковой дисперсией. Последняя используется для моделирования границ профиля растворения методом Монте-Карло.

Рассмотренная модель использована при разработке и промышленном внедрении рецептуры матричных таблеток пролонгированной формы 2-этил-3-метил-6-гидроксипиридина сукцината (торговое название «Армадин») в ООО «Микрохим» (г. Рубежное, Украина).

Список литературы

1. Черный, А. А. Разработка композиционных полимерных матричных таблеток с заданным временем высвобождения изосорбида динитрата методом математического моделирования / А. А. Черный, С. А. Кондратов, Д. С. Олейников // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 187-196. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.24.
2. Volchegorskii, I. A. Comparative analysis of the anxiolytic effects of 3-hydroxypyridine and succinic acid derivatives / I. A. Volchegorskii, I. Y. Miroschnichenko, L. M. Rassokhina et al. // *Pharmacology and Toxicology*. – 2015. – 6. – P. 756-761. – doi:10.1007/s10517-015-2855-3.
3. Rumyantseva, S. A. Antioxidant treatment of ischemic brain lesions / S. A. Rumyantseva, A. I. Fedin, O. N. Sokhova // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. – 2012. – 8. – P. 842-845. – doi:10.1007/s11055-012-9646-3.
4. Voronina, T. A. Mexidol: Main neuropsychotropic effects and mechanisms of action / T. A. Voronina // *Pharmateca*. – 2009. – №6. – P. 35-38.
5. Быков, В. А. Изучение влияния различных факторов на высвобождение лекарственных веществ из матричных таблеток / В. А. Быков, Н. Б. Демина, В. А. Кеменова та ін. // *Хим. Фарм. Журнал*. – 2005. – №5. – С. 40-45. – doi:10.30906/0023-1134-2005-39-5-40-45.
6. Демина, Н. Б. Современные тенденции развития технологии матричных лекарственных форм с модифицированным высвобождением / Н. Б. Демина // *Хим. Фарм. Журнал*. – 2016. – №7. – С. 44-50. – doi:10.30906/0023-1134-2016-50-7-44-50.
7. Кондратов, А. П. Капсулирование в полимерных пленках / А. П. Кондратов, А. Н. Громов, В. Н. Манин. – Москва: Химия, 1990. – 192 с.
8. Siermann, J. Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) / J. Siermann, N. A. Peppas // *Advanced drug delivery reviews*. – 2012. – V. 64. – P. 163-174. – doi:10.1016/j.addr.2012.09.028.
9. Dash, S. Kinetic modeling on drug release from controlled drug delivery systems / S. Dash et al. // *Acta Pol Pharm*. – 2010. – V. 67. – №. 3. – P. 217-223.
10. Xu, G. Influence of formulation change on drug release kinetics from hydroxypropylmethylcellulose matrix tablets / G. Xu, H. Sunada // *Chemical and pharmaceutical bulletin*. – 1995. – V. 43. – №. 3. – P. 483-487. – doi:10.1248/cpb.43.483.
11. Chorny, A. Development of a bootstrap-model for determining the release of medicinal preparations in the human organism / A. Chorny, R. Savyak, S. Kondratov // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2017. – №. 3 (6). – С. 43-49. – doi: 10.15587/1729-4061.2017.102182.
12. Державна Фармакопея України: в 3 т. / Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». – 2-е вид. – Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2015. – Т. 1 – 1126 с.
13. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
14. Лапач, С. Н. Статистические методы в медико-биологических исследованиях с использованием Excel / С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич. – Киев: Морион, 2001. – 408 с.
15. Бочаров, П. П. Теория вероятностей и математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – М.: Физматлит, 2005. – 296 с.

References (transliterated)

1. Chernyy, A. A., Kondratov, S.A., Oleynikov, D. S. Razrabotka kompozitsionnykh polimernykh matrichnykh tabletok s zadannym vremenem vysvobozhdeniya izosorbida dinitrata metodom matematicheskogo modelirovaniya [Development of composite polymer matrix tablets with a given release time of isosorbide dinitrate by mathematical modeling]. *Vestnik NTU «KhPI», Seriya: Novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh [Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies]*, 2019, 5 (1330), 187-196, doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.24.
2. Volchegorskii, I. A., Miroschnichenko, I. Y., Rassokhina, L. M. et al. Comparative analysis of the anxiolytic effects of 3-hydroxypyridine and succinic acid derivatives. *Pharmacology and Toxicology*, 2015, 6, 756-761, doi: 10.1007/s10517-015-2855-3.
3. Rumyantseva, S. A., Fedin, A.I., Sokhova, O. N. Antioxidant treatment of ischemic brain lesions. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, 2012, 8, 842-845, doi: 10.1007/s11055-012-9646-3.
4. Voronina, T. A. Mexidol: Main neuropsychotropic effects and mechanisms of action. *Pharmateca*, 2009, 6, 35-38.
5. Bykov, V. A., Demina, N. B., Kemenova V. A., et al. Izucheniye vliyaniya razlichnykh faktorov na vysvobozhdeniye lekarstvennykh veshchestv iz matrichnykh tabletok [Study of the influence of various factors on the release of drugs from matrix tablets]. *Khim. Farm. Zhurnal [Chem. Farm. Journal]*, 2005, 5, 40-45, doi: 10.30906/0023-1134-2005-39-5-40-45.
6. Demina, N. B. Sovremennyye tendentsii razvitiya tekhnologii matrichnykh lekarstvennykh form modifitsirovannym vysvobozhdeniyem [Current trends in the technology of modified release matrix dosage forms] *Khim. Farm. Zhurnal [Chem. Farm. Journal]*, 2016, 7, 44-50, doi: 10.30906/0023-1134-2016-50-7-44-50.
7. Kondratov, A. P., Gromov, A. N., Manin, V. N. Kapsulirovaniye v polimernykh plenkach [Encapsulation in polymer films]. Moskva: Khimiya, 1990, 192.
8. Siermann, J., Peppas, N. A. Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC). *Advanced drug delivery reviews*, 2012, 64, 163-174, doi: 10.1016/j.addr.2012.09.028.
9. Dash, S. et al. Kinetic modeling on drug release from controlled drug delivery systems. *Acta Pol Pharm*, 2010, 67, 3, 217-223.
10. Xu, G., Sunada, H. Influence of formulation change on drug release kinetics from hydroxypropylmethylcellulose matrix tablets. *Chemical and pharmaceutical bulletin*, 1995, 43, 3, 483-487, doi: 10.1248/cpb.43.483.
11. Chorny, A., Savyak, R., Kondratov, S. Development of a bootstrap-model for determining the release of medicinal preparations in the human organism. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [East European Journal of Advanced Technology]*, 2017, 3 (6), 43-49, doi: 10.15587/1729-4061.2017.102182.
12. Derzhavna Farmakopeya Ukraini: v 3 t. 2-ye vid. [State Pharmacopoeia of Ukraine: in 3 volumes. 2-d ed.] Kharkiv: Derzhavne pidpriemstvo «Ukrains'kiy naukoviy farmakopeyniy tsentr yakosti likars'kikh zasobiv» [State Enterprise "Ukrainian Scientific Pharmacopoeial Center for Medicinal Products Quality"], 2015, 1, 1126.

13. **Kobzar', A. I.** Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied Mathematical Statistics]. M.: Fizmatlit, 2006, 816.
14. **Lapach, S. N., Chubenko, A. V., Babich, P. N.** Statisticheskiye metody v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh s ispol'zovaniyem Excel [Statistical methods in biomedical research using Excel]. Kyev: Morion, 2001, 408.
15. **Bocharov, P. P., Pechinkin, A. V.** Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. M.: Fizmatlit, 2005, 296.

Сведения об авторах (About authors)

Черный Александр Александрович – аспирант, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, аспирант кафедры высшей математики и компьютерной технологии; г. Рубежное, Украина. Научный сотрудник отдела экспериментальной разработки ООО НПФ «Микрохим»; г. Рубежное, Украина; ORCID: 0000-0002-6949-9247; e-mail: chornyi@microkhim.com.

Alexandr Chornyi – Postgraduate, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, postgraduate of the department of mathematics and computer technologies; Rubizhne, Ukraine. Research Fellow, Experimental Development Department, Research and Production Company "Microkhim" Ltd; Rubizhne, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6949-9247; e-mail: chornyi@microkhim.com.

Кондратов Сергей Алексеевич – доктор химических наук, профессор, Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, профессор кафедры высшей математики и компьютерной технологии; г. Рубежное, Украина; ORCID: 0000-0002-1963-0155; e-mail: kondratovsa@gmail.com.

Serhii Kondratov – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Institute of Chemical Technology Volodymyr Dahl's East Ukrainian National University, Professor of the department of mathematics and computer technologies; Rubizhne, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1963-0155; e-mail: kondratovsa@gmail.com.

Савяк Роман Прокопович – кандидат химических наук, доцент, научный сотрудник отдела экспериментальной разработки ООО НПФ «Микрохим»; г. Рубежное, Украина; ORCID: 0000-0001-9691-9473; e-mail: savyak@microkhim.com.

Roman Savyak – PhD, Associate Professor, Research Fellow, Experimental Development Department, Research and Production Company "Microkhim" Ltd; Rubizhne, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9691-9473; e-mail: savyak@microkhim.com.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Черный, А. А. Разработка рецептуры матричных композиций 2-этил-3-метил-6-гидроксиэтилпиридина сукцината для таблеток пролонгированного действия на основе полимерных связующих / **А. А. Черный, С. А. Кондратов, Р. П. Савяк** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 105-113. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.12.

Please cite this article as:

Chornyi, A., Kondratov, S., Savyak, R. Development of the recipe for matrix compositions of 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxymethylpyridine succinate for tablets of prolonged action based on polymeric bonding. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 105-113, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.12.

Будь ласка, посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Черный, О. О. Математичне моделювання вивільнення *in vivo* лікарських препаратів що іонізуються з матричних композиційних таблеток на основі полімерних сполучних / **О. О. Черный, С. О. Кондратов, Р. П. Савяк** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 105-113. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.12.

АНОТАЦІЯ Проведено дослідження кінетики вивільнення 2-етил-3-метил-6-гідроксіпіридіна сукцината з таблеток пролонгованої дії, отриманих з використанням полімерів гідроксипропілметилцелюлози марок K4M, K15M, K100M і K200M. Перевірено гіпотезу про можливість прийняття для вибірок нормального розподілу відгуку - ступеня вивільнення препарату. Виявлено слабкий вплив природи полімеру на кінетику вивільнення – максимальна відносна різниця між середніми значеннями для кожного полімеру не перевищує 15%. Проведена серія експериментальних досліджень в буферних розчинах при рН 1,2; 4,5 і 6,8 для виявлення впливу рН на кінетику вивільнення. Виявлено суттєвий вплив рН на швидкість вивільнення - при рН 1,2 спостерігається більш швидке вивільнення. Криві розчинення при рН 4,5 і 6,8 практично збігаються. На прикладі субстанції 2-етил-3-метил-6-гідроксіпіридіна сукцината розроблена математична модель кінетики вивільнення *in vivo*, що відображає вплив рН середовища на швидкість вивільнення з матричних таблеток лікарських препаратів, іонізованих у водних середовищах. Модель заснована на статистичному дослідженні даних кінетики вивільнення *in vitro* при рН 1,2; 4,5; 6,8, з наступною побудовою на їх основі кубічних сплайнів для усереднених кривих і виявленням наявності впливу рН. Ці дані використовуються на стадії моделювання *in vivo* з урахуванням ступеня вивільнення при рН на ділянці шлунково-кишкового тракту, що перебує поточною. Умовою застосування моделі є наявність нормального розподілу похибок вимірювань *in vitro* з однаковою дисперсією, що не залежить від рН. Значення дисперсії використовується для моделювання кордонів профілю розчинення методом Монте-Карло. Розроблено процедуру оцінки верхніх і нижніх меж профілів вивільнення в організмі методом Монте-Карло шляхом генерування значень вивільнення для 100 випробувань на основі розробленої моделі кінетики вивільнення. Модель використана при розробці і промислового впровадженні рецептури матричних таблеток пролонгованої форми 2-етил-3-метил-6-гідроксіпіридіна сукцината (торгова назва «Армадін») в ТОВ «Мікрохім».

Ключові слова: 2-етил-3-метил-6-гідроксіметилпіридіна сукцинат; матричні таблетки; гранули; статистичний аналіз; кінетика вивільнення; математичне моделювання.

Поступила (received) 27.08.2019

УДК 629.764.07

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПООЧЕРЕДНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА В ОДНОМ АГРЕГАТЕ

О. И. ШИНКОРЕНКО*¹, М. В. КОСТЕНКО¹, М. А. ЦЕЙТЛИН², В. Ф. РАЙКО²

¹ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, г. Днепр, УКРАИНА

² кафедра химической техники и промышленной экологии Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, УКРАИНА

*e-mail: shinkorenkooleg@gmail.com

АННОТАЦИЯ В статье рассматривается возможность применения агрегатов термической нейтрализации компонентов ракетного топлива для обезвреживания опасных промышленных отходов. Рассматриваются преимущества агрегатов термической нейтрализации, описывается принцип работы агрегатов, на примере высококипящих, токсичных компонентов ракетного топлива приводятся химические реакции, которые происходят в камере сжигания. Камера сжигания является составной частью агрегата, именно в камере сжигания в среде создаваемых высоких температур происходит процесс уничтожения опасных веществ. Учитывая высокую стоимость агрегатов нейтрализации, что будет являться фактором препятствующим широкомасштабному внедрению агрегатов для снижения техногенной нагрузки на экологию Украины, предлагается вариант сокращения затрат при использовании агрегатов термической нейтрализации путем объединения функции агрегата нейтрализации окислителя и агрегата нейтрализации горючего в едином, универсальном агрегате. Статья обосновывает актуальность и необходимость работ по созданию универсального агрегата термической нейтрализации с точки зрения экономических и экологических аспектов. В статье укрупненно описывается технология и методика исследовательских испытаний опытных образцов узлов подачи паров и промстоков высококипящих компонентов ракетного топлива в агрегат нейтрализации. Узлы подачи паров и промстоков высококипящих компонентов ракетного топлива рассматриваются, как наиболее критичные составные части универсального агрегата нейтрализации с точки зрения смены нейтрализуемого вещества. Опыты проводились на водных растворах компонентов ракетного топлива, которые в данном случае, имитировали контакт внутренних полостей узлов подачи с агрессивными, токсичными средами. Создавались условия, при которых существовала вероятность взаимодействия остатков компонента ракетного топлива в застойных зонах в момент смены подаваемого компонента. В рамках проведенных исследовательских испытаний опытных образцов были рассмотрены и проанализированы полученные результаты. Приводятся выводы, подтверждающие практически возможность применения единых узлов подачи.

Ключевые слова: агрегат нейтрализации; узлы подачи; поочередная подача; взаимодействие компонентов ракетного топлива; универсальный агрегат термической нейтрализации

STUDY OF THE POSSIBILITY OF SEQUENTIAL THERMAL NEUTRALIZATION OF THE ROCKET FUEL WASTE IN ONE UNIT

O. SHINKORENKO¹, M. KOSTENKO¹, M. TSEYTLIN², V. RAYKO²

¹ Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, UKRAINE

² Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the article it is suggested to consider possibility of application of aggregates of thermal neutralization of components of rocket fuel for rendering of industrial hazwastes harmless. Advantages of aggregates of thermal neutralization are examined, principle of work of aggregates is described, and around to the example of high boiling, toxic components of rocket fuel chemical reactions that take place in the chamber of incineration are brought. A chamber of incineration is component part of aggregate, exactly in the chamber of incineration there is a process of elimination of hazardous substances in the environment of the created high temperatures. Taking into account the high cost of aggregates of neutralization, that will be a factor impedimental to widespread introduction of aggregates for the decline of the technogenic loading on ecology of Ukraine, the variant of reduction of expenses is offered at the use of aggregates of thermal neutralization by the association of function of aggregate of neutralization of oxidant and aggregate of neutralization of fuel in a single, universal aggregate. The article grounds actuality and necessity of works on creation of universal aggregate of thermal neutralization from the point of view of economic and ecological aspects. In the article technology and methodology of research tests of pre-production models of knots of serve of steams and hazwastes of high boiling components of rocket fuel are large-sized described in the aggregate of neutralization. The knots of serve of steams and hazwastes of high boiling components of rocket fuel are examined, as the most critical component parts of universal aggregate of neutralization from the point of view of changing of the neutralized substance. Tests carried out on water solutions of components of rocket fuel, which in this case, imitated the contact of internal cavities of knots of serve with aggressive, toxic environments. Terms at that there was probability of co-operation of bits and pieces of component of rocket fuel in stagnant zones in the moment of changing of the

given component were created. Within the framework of the conducted research tests of pre-production models were considered and analyzed the got results. Conclusions over, confirmative possibility of application of single knots of serve practically, are brought.

Keywords: neutralization unit; feed units; alternate feed; interaction of rocket fuel components; universal thermal neutralization unit

Введение

Обезвреживание и утилизация опасных промышленных отходов в настоящее время является одним из способов снижения техногенной нагрузки на экологию Украины [1]. Это создает экономические и технологические предпосылки необходимости разработки и внедрения новых безопасных методов избавления биосферы от опасности ее загрязнения отходами производства и потребления [2,3].

Одним из направлений решения этой задачи является создание технологий и аппаратуры термической нейтрализации (пиролиза) отходов, образующихся при работах с высококипящими компонентами ракетного топлива (КРТ). Такими отходами являются тетраоксид азота (азотный тетраоксид (АТ)) и несимметричный диметилгидразин (НДМГ) в жидком состоянии в виде водных растворов и в газообразной форме в виде дренажных газов. Эти отходы являются высокотоксичными и относятся к первому классу опасности [4].

Принцип действия агрегатов нейтрализации (АН) основан на процессе доокисления опасных горючих веществ в воздушной среде или восстановления окислителя в топливозооной среде под воздействием высоких температур в камере термической нейтрализации. Такой процесс позволяет полностью уничтожить токсичные и опасные вещества [5]. В настоящее время рассматривается возможность применения агрегатов нейтрализации ракетного топлива для обезвреживания токсичных отходов различного происхождения, которые накапливаются в хранилищах, создавая риск возникновения техногенных катастроф [6]. Применение АН рассматривается в рамках уничтожения отходов, схожих по свойствам с КРТ (АТ и НДМГ). Далее по тексту под КРТ будут подразумеваться, также, и опасные промышленные отходы, которые планируется уничтожать при помощи АН.

Существующие АН разделяются на агрегаты нейтрализации окислителя (АН О) и агрегат нейтрализации горючего (АН Г). Это объясняется многолетним опытом практической эксплуатации ракетно-космических комплексов с применением КРТ, который неоднократно подтверждал целесообразность обязательного соблюдения мер безопасности при обращении с высококипящими КРТ. Одной из таких мер является разделение работ с АТ и НДМГ территориально и по времени. Эти меры безопасности касались и АН, однако, ввиду высокой стоимости агрегатов, подход по использованию АН О или АН Г для определенных видов отходов является препятствием для применения АН в проектах по нейтрализации опасных промышленных отходов.

Цель работы

Оценка возможности создания универсального агрегата термической нейтрализации (УАТН), который совмещал бы в себе функции АН О и АН Г и позволял бы поочередно производить нейтрализацию опасных веществ, схожих по химическим свойствам с АТ и НДМГ для снижения влияния вышеуказанного отрицательного фактора (высокой стоимости агрегатов, работающих в паре).

Предпосылки к идее последовательной нейтрализации отходов горючего и окислителя основаны на применении на входе в агрегат разбавленных КРТ, доведенных до параметров, соответствующих технической характеристике агрегата. Разбавленные отходы КРТ в виде промстоков и дренажных газов характеризуются более низкой активностью взаимодействия. При этом вопросы применения оборудования, объединяющего работы с КРТ до настоящего времени не рассматривались, ввиду существующей опасности, обусловленной высокой энергетикой взаимодействия АТ и НДМГ.

Обзор литературы

Существуют различные способы утилизации компонентов ракетного топлива [7,8], такие как: переработка в минеральную подкормку для азотсодержащих компонентов, переработка на промышленных предприятиях, применение в качестве добавок в дизельное топливо (самин, изонит), утилизация методом высокотемпературного сжигания мобильными установками, утилизация методом высоко-температурного сжигания в промышленных установках.

Применение УАТН относится к утилизации методом высокотемпературного сжигания мобильными установками. Данный метод имеет ряд преимуществ. К ним относятся:

- отсутствие необходимости транспортировки опасных веществ на нейтрализацию, возможность использования агрегата непосредственно в зоне хранения отходов и опасных веществ;

- полная нейтрализация опасных веществ, характеризуется отсутствием после переработки побочных химических продуктов.

Эти преимущества позволяют при эксплуатации УАТН сократить сопутствующие расходы и обеспечить конкурентоспособные характеристики агрегата нейтрализации.

В основу принципа работы агрегатов нейтрализации заложен метод высокотемпературного сжигания остаточных продуктов КРТ.

По своим свойствам АТ представляет собой сильный окислитель, высокотоксичный и

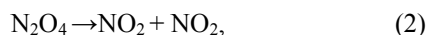
коррозионно-активный. При смешивании с органическими веществами взрывоопасен [9]. НДМГ – это легковоспламеняющаяся жидкость. В присутствии окислителя существует высокая вероятность взрыва. При контакте с окислителем воспламенение возможно уже с 50% водным раствором НДМГ [10].

Реакция окисления НДМГ в условиях воздействия высокой температуры (900-1050°C) имеет вид [1,2]:

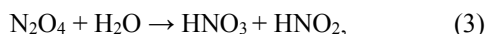


В основе процесса пиролиза дренажных газов и водных растворов АТ лежат процессы термического разложения АТ и восстановления окислов азота в топливовоздушной среде [2,3].

Тetraоксид азота N_2O_4 – димер, который может существовать при температуре ниже 140°C. При более высоких температурах происходит диссоциация:



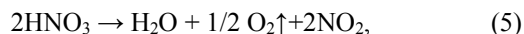
В водном растворе N_2O_4 взаимодействует с водой по реакции:



Азотистая кислота, в свою очередь, распадается:



Под воздействием высокой температуры более 1000 °C азотная кислота разлагается по реакции:



Процесс взаимодействия АТ и НДМГ характеризуется выделением большого количества энергии [3] и описывается уравнением:



Методика исследования

С целью объединения функций АН О и АН Г в одном агрегате проведена теоретическая оценка наиболее критичных узлов агрегата с точки зрения смены КРТ. По результатам аналитической оценки была обоснована целесообразность создания УАТН на базе АН Г. При предварительной проработке возможности создания УАТН были определены узлы агрегата, которые с наибольшей степенью вероятности подвержены воздействию критических нагрузок, обусловленных взаимодействием КРТ при смене нейтрализуемого вещества, а также сформированы предложения и мероприятия по доработке АН Г.

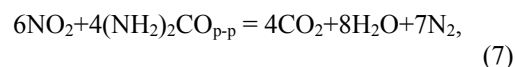
С целью проверки возможности создания УАТН и экспериментального подтверждения безопасной работы наиболее критичных узлов универсального агрегата были проведены исследовательские испытания опытных образцов узла подачи паров и узла подачи промстоков в УАТН, в

которых, с учетом проведенного анализа, возможно возникновение аварийной ситуации.

Испытания проводились на высококипящих компонентах ракетного топлива (АТ и НДМГ) в два этапа. На первом этапе в лабораторных условиях исследовалась интенсивность взаимодействия водного раствора АТ с водным раствором НДМГ с определением возможных значений температуры, которые могут создаваться в узлах подачи, при смене КРТ. На втором – проверялась технология подготовки опытных узлов подачи промстоков и паров КРТ к смене стоков горючего на окислитель и наоборот, а также выявлялись возможные последствия их взаимодействия в застойных зонах указанных устройств.

В качестве нейтрализующего вещества для удаления остатков КРТ в застойных зонах оборудования перед сменой компонента применен, кроме воды, и вариант с промывкой полости узла подачи 30 % водным раствором карбамида $((\text{NH}_2)_2\text{CO})_{\text{p-p}}$. Ожидаемый эффект должен был обеспечить более качественное, по сравнению с водой, удаление остатков КРТ, учитывая тот факт, что водный раствор карбамида должен реагировать с оксидами азота NO_x .

Реакция водного раствора карбамида с оксидами азота описывается следующим уравнением:



Для сравнения показателей эффективности процесса нейтрализации объекта, удаление остатков КРТ на каждом режиме выполняли в следующем порядке: при первых двух заполнениях (НДМГ – АТ) узла подачи промстоками – удаление КРТ выполняли раствором карбамида (30%), а последующие два заполнения – водой.

В лабораторном исследовании изучали зависимость изменения температуры реакционной смеси от концентрации смешиваемых реагентов, в качестве которых использовали 10-ти, 20-ти и 30-ти процентные водные растворы АТ и НДМГ, а также 30 % раствор карбамида.

Заранее подготовленные реагенты смешивали в сосуде, с возможностью измерения температуры. В процессе опыта фиксировали изменение температуры и визуально оценивали признаки интенсивности протекания реакции.

Исследовательские испытания опытных образцов узла подачи паров КРТ и узла подачи промстоков КРТ заключались в контроле процессов, проходящих в данных узлах по изменению температуры и давления. Для этого в узлы подачи КРТ были установлены соответствующие датчики температуры, и давления. Места установки располагались в непосредственной близости к застойным зонам (местам, где возможна задержка утилизируемых веществ).

Схема стенда испытаний узлов подачи КРТ в УАТН приведена на рис. 1.

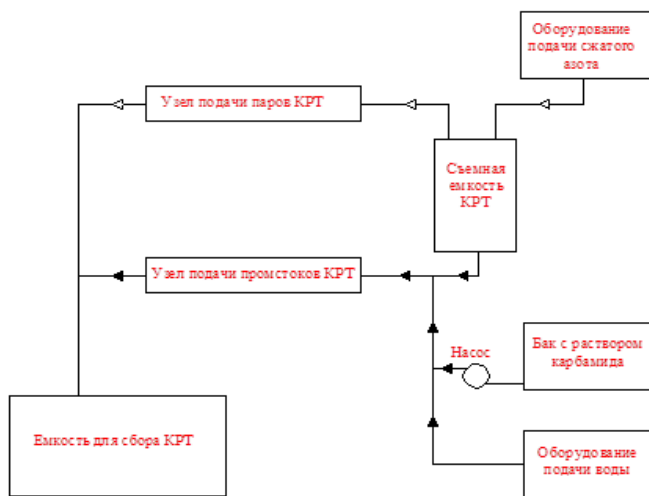


Рис. 1 – Схема стенда испытаний узлов подачи КРТ в УАТН

Эксперимент состоял в попеременном заполнении узла подачи промстоков водными растворами КРТ с последующей выдержкой в течение 2-х часов при непрерывном контроле давления и температуры. Перед сменой компонента проводилась нейтрализация узлов подачи путем промывки 30 % раствором карбамида или водой и продувки азотом. Для оценки качества промывки отбирались и подвергались химическому анализу смывы из испытываемых узлов. В опытах использовали растворы КРТ с теми же концентрациями, что и в лабораторных условиях.

Для узла подачи паров проводилось попеременное заполнение испытываемых устройств дренажными газами и выдержка под рабочим давлением 0,2 МПа. Концентрация газов в опытах варьировалась и составляла 80, 100 и 120 % от номинальных параметров на входе в агрегат. Номинальная концентрация соответствует максимальному установленному значению на входе в агрегат нейтрализации, согласно техническим характеристикам агрегата.

В процессе испытаний проводилась фиксация данных, а именно нарастание давления и/или увеличение температуры, отражающие процесс реагирования подаваемого компонента ракетного топлива с образовавшимися в застойных зонах остатками предыдущего компонента, после нейтрализации узла на предыдущем этапе.

Обсуждение результатов

Результаты лабораторного эксперимента

Исследование соединения водного раствора НДМГ с водным раствором карбамида показало, что температура реакционной смеси в течение опыта не меняется, а видимые признаки протекания химического взаимодействия (изменение цвета, выделение осадка или газов) отсутствуют.

Что касается взаимодействия водного раствора АТ с водным раствором карбамида, то в процессе опыта раствор обесцвечивался (до реакции водные растворы АТ имели цвет от голубого до бирюзового в зависимости от концентрации). Реакция характеризовалась образованием нейтральных веществ. Также, ожидаемо, наблюдалось выделение газа, причем интенсивность газообразования росла с увеличением концентрации АТ. В то же время значительного изменения температуры реакционной смеси не наблюдалось. Во время взаимодействия 30 % водного раствора карбамида с 50 % водным раствором АТ наблюдалось выпадение нерастворимого осадка белого цвета. Поэтому, во избежание засорения элементов опытного образца продуктами взаимодействия АТ и карбамида, от использования последнего для подготовки (нейтрализации) узла подачи перед сменой компонента пришлось отказаться.

Реакция растворов АТ и НДМГ сопровождалась ростом температуры и выделением паров. Концентрации реагентов оказывают значительное влияние на интенсивность взаимодействия. Так, если содержание АТ и НДМГ в водном растворе составляло 10 %, внешних проявлений реакции не наблюдалось, а температура прореагировавшей смеси повышалась на 7°C. Но уже при 20-ти процентных растворах наблюдалось интенсивное выделение газов и повышение температуры на 20°C.

Результаты исследовательских испытаний узлов подачи паров и промстоков КРТ.

Результаты промывки узлов подачи паров и промстоков после работы с АТ показали, что концентрация этого компонента в смывах снижалась в среднем в 50-000 раз. В газовой фазе снижение концентрации АТ достигало в среднем в 5000-50000 раз.

Промывка исследуемого оборудования после работы с НДМГ показала, что концентрация в смывах снижалась в среднем в 5-20 раз, а в газовой фазе в среднем в 2-5 раз.

Как видно из приведенных данных, снижение в результате промывки концентрации НДМГ, как в смывах, так и в газовой фазе оказалось на несколько порядков меньшим, чем это наблюдалось для АТ. По нашему мнению, это объясняется известным свойством НДМГ адсорбироваться материалом внутренних поверхностей оборудования.

Опыты с последовательной подачей водных растворов АТ и НДМГ с промежуточной промывкой показали лишь незначительные изменения температуры внутри оборудования для подачи растворов. Аналогичные показатели в части изменения температуры наблюдались и в узле подачи паров. Изменения значений давления в узле подачи промстоков также носили характер незначительных колебаний.

В то же время, в узле подачи паров наблюдалось определенное взаимодействие

остаточных продуктов КРТ, накапливающихся в застойных зонах. Это взаимодействие характеризовалось увеличением давления при заполнении узла парами НДМГ, а также, с меньшей интенсивностью, при заполнении узла парами АТ. Этот же эффект, как указывалось выше, наблюдался и в лабораторных опытах. С большой долей вероятности реакция взаимодействия КРТ имела место за счет сконденсировавшихся остатков предыдущего компонента топлива. Следует, однако, отметить, что зафиксированные показатели наличия реакции не имели значений, которые можно было бы рассматривать как потенциально опасные.

В целом, исследовательские испытания показали эффективность предложенного способа подготовки узлов подачи нейтрализуемых веществ.

Выводы

Исследовательские испытания опытных образцов узлов подачи КРТ в УАТН подтвердили возможность применения единых магистралей подачи паров и промстоков КРТ в агрегат нейтрализации.

По результатам анализа полученных показателей были выработаны мероприятия и предложения по доработке конструкции и технологии работы АНГ, которые должны быть учтены при проектировании УАТН.

Проведенные испытания дают возможность обосновать перспективность проекта по созданию УАТН и дальнейшего внедрения его в работы по утилизации опасных промышленных отходов, как для использования в перспективных проектах РКК, работающих с высококипящими КРТ, так и с целью снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Список литературы

1. **Онищенко, Г. Г.** Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / **Г. Г. Онищенко, С. М. Новиков, Ю. А. Рахманин.** – М. – 2001. – 317 с.
2. **Мельник, Л. Г.** Методы оценки экологических потерь: Монография / **Л. Г. Мельник, О. И. Каринцева.** – Сумы. – 2004. – 122 с.
3. **Телиженко, А. М.** Отходы – вторичные ресурсы: управление, экономика, организация: коллективная монография: в 2 томах / **А. М. Телиженко.** – Сумы. – 2013. – 258 с.
4. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
5. **Шинкоренко, О. И.** Агрегаты нейтрализации паров и водных растворов компонентов ракетного топлива. Накопленный опыт и перспективы совершенствования агрегатов нейтрализации / **О. И. Шинкоренко, А. А. Старков** // *Космическая техника. Ракетное вооружение.* – 2018. – Вып. 1. – С. 58-62.
6. **Касимов, А. М.** Воздействие накопителей промышленных отходов на окружающую среду / **А. М. Касимов, В. Ю. Джафаров, А. В. Носова** // *Людина і*

- довкілля. Проблеми неоекології.* – 2004. – Вип. 5. – С. 21-26.
7. **Колесников, С. В.** Окисление несимметричного диметилгидразина (гептила) и идентификация продуктов его превращения при проливах. Монография / **С.В. Колесников.** – Новосибирск: ИП «СибАК», 2014. – 110 с.
 8. Жидкое ракетное топливо в регионе ОБСЕ: обзор аспектов утилизации. – 2008. – URL: <https://www.osce.org/ru/fsc/35906?download=true>.
 9. **Касимов, А. М.** Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами / **А. М. Касимов, В. Т. Семенов, Н. Г. Щербань, В. В. Мясоедов.** – Харьков : ХНАГХ, 2008. – 511 с.
 10. **Егорычев, В. С.** Топлива химических ракетных двигателей / **В. С. Егорычев, В.С. Кондрусев.** – Самара: Изд. СГАУ, 2007. – 72 с.

References (transliterated)

1. **Onischenko, G.G., Novikov, S. M., Rahmanin, Yu. A.** Osnovyi otsenki riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii himicheskikh veschestv, zagryaznyayuschih okruzhayuschuyu sredu [Fundamentals of risk assessment for public health when exposed to chemicals polluting the environment]. М., 2001, 317.
2. **Melnik, L. G., Karintseva, O. I.** Metodyi otsenki ekologicheskikh poter: Monografiya [Environmental Loss Assessment Methods: Monograph]. Sumy, 2004, 122.
3. **Telizhenko, A. M.** Othodyi – vtorichnyie resursyi: upravlenie, ekonomika, organizatsiya: kollektivnaya monografiya: v 2 tomah [Waste – secondary resources: management, economics, organization: collective monograph: in 2 volumes]. Sumy: Sumy State University, 2013, 258.
4. GOST 12.1.007-76 Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednyie veschestva. Klassifikatsiya i obschie trebovaniya bezopasnosti. [SS 12.1.007-76. System of standards of safety of work. Harmful substances. Classification and general safety requirements].
5. **Shinkorenko, O. I., Starkov, A. A.** Agregaty neytralizatsii parov i vodnyih rastvorov komponentov raketnogo topliva. Nakoplenyyi opyt i perspektivyi sovershenstvovaniya agregatov neytralizatsii [Units for the neutralization of vapors and aqueous solutions of rocket fuel components. The accumulated experience and prospects for improving the units of neutralization]. *Kosmicheskaya tehnika. Raketnoe vooruzhenie [Space technology. Missile weapons]*, 2018, 1, 58-62.
6. **Kasimov, A. M., Dzhafarov, V. Yu, Nosova, A. V.** Vozdeystvie nakopiteley promyshlennyyih othodov na okruzhayuschuyu sredu [The environmental impact of industrial waste storage]. *Lyudina I dovkllyya. Problemi neoeologiiyi. [Man and the environment. Problems of neoecology]*, 2004, 5, 21-26.
7. **Kolesnikov, S. V.** Okislenie nesimmetrichnogo dimetilgidrazina (geptila) i identifikatsiya produktov ego prevrascheniya pri prolivah. Monografiya [Oxidation of asymmetric dimethylhydrazine (heptyl) and identification of the products of its transformation during straits. Monograph]. Novosibirsk : NP «SibAK», 2014, 110.
8. Zhidkoe raketnoe toplivo v regione OBSE: obzor aspektov utilitatsii. [Liquid Propellant in the OSCE Area: Overview of Disposal Aspects], 2008. Available at: <https://www.osce.org/ru/fsc/35906?download=true>.

9. **Kasimov, A. M., Semenov, V. T., Scherban, N. G., Myasoedov, V. V.** *Sovremennyye problemy i resheniya v sisteme upravleniya opasnymi othodami [Current problems and solutions in the hazardous waste management system]*. Kharkov: KhNAME, 2008, 511.
10. **Egoryichev, V. S., Kondrusev, V. S.** *Topliva himicheskikh raketnykh dvigateley [Fuel chemical rocket engines]*. Samara: Ph. SSAU, 2007, 72.

Сведения об авторах (About authors)

Шинкоренко Олег Игоревич – начальник группы Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, г. Днепр, Украина, e-mail: shinkorenkooleg@gmail.com.

Oleg Shinkorenko – Head of the group at Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: shinkorenkooleg@gmail.com.

Костенко Михаил Викторович – начальник отдела Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля, г. Днепр, Украина, e-mail: mixey_k@i.ua.

Mikhail Kostenko – Head of the department at Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: mixey_k@i.ua.

Цейтлин Михаил Абрамович – доктор технических наук, профессор, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, ORCID: 0000-0002-2452-7814, e-mail: michelzeitlin@gmail.com.

Mikhail Tseytlin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2452-7814; e-mail: michelzeitlin@gmail.com.

Райко Валентина Федоровна – кандидат технических наук, профессор, кафедра химической техники и промышленной экологии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, ORCID: 0000-0002-5527-1874, e-mail: raiko.hpi@gmail.com.

Valentina Rayko – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-5527-1874, e-mail: raiko.hpi@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шинкоренко, О. И. Исследование возможности поочередной термической нейтрализации отходов ракетного топлива в одном агрегате / **О. И. Шинкоренко, М. В. Костенко, М. А. Цейтлин, В. Ф. Райко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 114-119. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.13.

Please cite this article as:

Shinkorenko, O., Kostenko, M., Tseytlin, M., Rayko, V. Study of the possibility of sequential thermal neutralization of the rocket fuel waste in one unit. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 114-119, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.13.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Шинкоренко, О. І. Дослідження спроможності почергової термічної нейтралізації відходів ракетного палива в одному агрегаті / **О. І. Шинкоренко, М. В. Костенко, М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 114-119. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.13.

АНОТАЦІЯ У статті розглянуто можливість застосування агрегатів термічної нейтралізації компонентів ракетного палива для знешкодження небезпечних промислових відходів. Наведено переваги агрегатів термічної нейтралізації, описано принцип роботи агрегатів на прикладі висококиплячих, токсичних компонентів ракетного палива, наведено хімічні реакції, що відбуваються у камері спалювання. Камера спалювання є складовою частиною агрегату, саме у ній у середовищі створюваних високих температур відбувається процес знищення небезпечних речовин. Враховуючи високу вартість агрегатів нейтралізації, що буде чинником, який перешкоджає впровадженню агрегатів для зниження техногенного навантаження на екологію України, пропонується варіант скорочення витрат при використанні агрегатів термічної нейтралізації шляхом об'єднання функції агрегату нейтралізації окисника й агрегату нейтралізації пального в єдиному, універсальному агрегаті. Обґрунтовано актуальність і необхідність робіт зі створення універсального агрегату термічної нейтралізації з точки зору економічних і екологічних аспектів. У статті загалом описано технологію і методику дослідницьких випробувань дослідних зразків вузлів подання пари і промстоков висококиплячих компонентів ракетного палива в агрегат нейтралізації. Вузлі подання пари і промстоков висококиплячих компонентів ракетного палива розглядаються, як найбільш критичні складові частини універсального агрегату нейтралізації з точки зору зміни речовини, що нейтралізується. Досліди проводилися на водних розчинах компонентів ракетного палива, які в даному випадку, імітували контакт внутрішніх порожнин вузлів подання з агресивними, токсичними середовищами. Були створені умови, при яких існувала вірогідність взаємодії залишків компонента ракетного палива в застійних зонах у момент зміни компонента палива. У рамках проведених дослідницьких випробувань дослідних зразків були розглянуті та проаналізовані отримані результати. Наведено висновки, що підтверджують практичну можливість застосування єдиних вузлів подання. **Ключові слова:** агрегат нейтралізації; вузли подавання; почергова подача; взаємодія компонентів ракетного палива; універсальний агрегат термічної нейтралізації

Поступила (received) 28.08.19

УДК 621.316

doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14

ВПЛИВ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 6-10кВ ПАТ «ЧЕРНІГІВОбленерго»

В. І. ТКАЧ¹, В.М. БЕЗРУЧКО², Р.О. БУЙНИЙ^{2*}

¹ відділ перспективного розвитку, ПАТ «Чернігівобленерго», Чернігів, УКРАЇНА

² кафедра електричних систем і мереж, Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, УКРАЇНА

*e-mail: buinyiroman@gmail.com

АНОТАЦІЯ Однофазні замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю призводять до утворення ненормального режиму роботи мережі, який, у більшості випадків, переходить у коротке замикання, викликаючи знеструмлення споживачів та погіршуючи показники надійності електропостачання. Особливо актуальною зазначена проблема є у мережах 6-10кВ операторів систем розподілу в Україні та пострадянських країнах, у яких більшість мереж представлена розгалуженими повітряними лініями електропередавання. Не виключенням є і мережі ПАТ «Чернігівобленерго». Існує багато шляхів поліпшення показників надійності. Одні з яких направлені на підвищення структурної надійності електричної мережі, а інші – надійності електропостачання. Як правило перші повинні застосовуватися для нових електричних мереж, а другі – для існуючих, які знаходяться в експлуатації. Слід зазначити, що в ПАТ «Чернігівобленерго» вищезазначені електричні мережі експлуатуються понад 50 років. В умовах відсутності інвестицій для повної заміни існуючих електричних мереж повинні застосовуватися такі шляхи, які будуть найменш витратними та найбільш ефективними. Для їх обґрунтованого вибору необхідно знати розподіл видів пошкоджень у таких мережах та їх вплив на експлуатаційні показники надійності. У роботі проаналізовано статистичну інформацію по однофазним замиканням на землю в електричних мережах 6-10кВ усіх структурних підрозділів ПАТ «Чернігівобленерго» з 2012 по 2017 роки. Встановлено, що найбільша кількість знеструмлень припадає на пошкодження штирьової ізоляції (46,8% від загальної кількості) і спричиняє середньорічний недовідпуск електричної енергії 21,263 МВт·год/рік (45,9% від загального середньорічного недовідпуску). При цьому середнє значення тривалості одного знеструмлення, яке викликане тільки замиканнями на землю, складає біля 1,2 год/(рік·відкл), що перевищує допустимі норми. Показано, що для поліпшення надійності електропостачання споживачів у мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» необхідно, в першу чергу, зменшити тривалість знеструмлень, пов'язаних з пошуком пошкодженої ізоляції під час однофазних замикань на землю.

Ключові слова: розподільна мережа; ізольована нейтраль; повітряна лінія, замикання на землю; штирьова ізоляція; надійність електропостачання; знеструмлення

THE EFFECT OF SINGLE-LINE-TO-GROUND FAULTS ON THE OPERATIONAL RELIABILITY INDICATORS OF OVERHEAD LINES 6-10 kV PJSC «CHERNIGIVOBLENREGO»

V. TKACH¹, V. BEZRUCHKO², R. BUINYI²

¹ Department of Perspective Development, PJSC «Chernihivoblenergo», Chernihiv, UKRAINE

² Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, UKRAINE

ABSTRACT Single Line-to-Ground faults in power networks with isolated neutral lead to abnormal operation modes of the network. In most of the cases it evolves into line-to-line fault through ground and power-cuts, therefore decreasing the reliability of power supply. Especially this problem is presented in 6-10kV networks in Ukraine which consist mostly of overhead power lines. PJSC «Chernihivoblenergo» also faces this issue. There are several ways to improve the indicators of reliability. Some methods improve the structural reliability of electric network, the others might focus on the reliability of power supply. Usually the former are used for the new networks while the latter are effective for existing networks. It should be noted that PJSC «Chernihivoblenergo» has been operating the above-mentioned electrical networks for more than 50 years. In the presence of financial constraints, the most efficient methods should be used. To select the most cost efficient and still very effective solutions for boosting the reliability indicators of power networks 6-10kV it is necessary to know the statistics of different fault types and their impact on the power supply. The goal of this research is to study the statistics of single-line-to-ground faults in 6-10kV networks of PJSC «Chernihivoblenergo» and their impact on the reliability indicators of operation. Considered is the statistical distribution of single-line-to-ground faults in 6-10kV power networks of PJSC «Chernihivoblenergo» in 2012-2017. It has been established that the largest number of blackouts is caused by damage to the pin insulation (46.8% of the total), which causes an average annual undersupply of electric energy of 21.263 MW-h per year (45.9% of the total average annual undersupply). At the same time, the average time of one blackout caused by only single-line-to-ground faults is about 1.2 hour/(year·off), which exceeds the permissible norms. It is shown that in order to improve the

reliability of power supply to consumers in the 6-10 kV networks of PJSC «Chernihivoblenergo», it is necessary, first of all, to reduce the duration of the blackouts associated with the search for damaged insulation during single-line-to-ground faults.

Keywords: power network; isolated neutral; overhead power line; ground faults; pin insulation; reliability of power supply; de-energizing

Вступ

Як відомо, однофазні замикання на землю (ОЗЗ) в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю спричиняють утворення ненормальних режимів роботи. За таких режимів напруга на неушкоджених фазах електрично зв'язаної мережі може досягати лінійного значення, що призводить до більш інтенсивного старіння ізоляції лінії електропередавання (ЛЕП), однак споживачі в такій електричній мережі продовжують отримувати живлення, тому майже всі ЛЕП напругою 6-35 кВ виконані з ізолюваною нейтраллю.

Загальна довжина ЛЕП напругою 6-35 кВ в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю складає біля 85% від загальної сукупності мереж України усіх класів напруги, а повітряні лінії (ПЛ) напругою 6-10 кВ складають близько 73% від загальної довжини ЛЕП 6-35 кВ [1]. Саме на таких вітчизняних ПЛ з кожним роком спостерігається тенденція на збільшення кількості пошкоджень, зокрема пов'язаних з ОЗЗ, з подальшим їх переходом у міжфазні короткі замикання, і, як наслідок, до збільшення кількості та тривалості знеструмлення споживачів. Такі знеструмлення погіршують показники надійності електропостачання споживачів SAIDI, SAIFI та ENS [2], які у країнах Європейського Союзу на порядок менші ніж в Україні [3,4].

Існує багато шляхів поліпшення показників надійності. Одні з яких направлені на підвищення структурної надійності електричної мережі, а інші – надійності електропостачання [5-7]. Як правило перші повинні застосовуватися для нових електричних мереж, а другі – для існуючих, які знаходяться в експлуатації в ПАТ «Чернігівобленерго» понад 50 років. В умовах відсутності інвестицій для повної заміни існуючих електричних мереж перевага повинна надаватися таким шляхам підвищення показників надійності електропостачання споживачів, які будуть найменш витратними та найбільш ефективними.

Для вибору таких шляхів необхідно знати розподіл видів пошкоджень в електричних мережах 6-10кВ та їх вплив на експлуатаційні показники надійності.

Мета роботи

Дослідження ретроспективної інформації про види пошкоджень в мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» та встановлення впливу ОЗЗ на експлуатаційні показники надійності.

Виклад основного матеріалу

Під час експлуатації електричних мереж енергокомпанії, які займаються розподілом електричної енергії по мережах 0,38-150кВ, у відповідності до [8] зобов'язані збирати інформацію про виявлені дефекти та пошкодження у елементах електричних мереж 0,38-20кВ. Не виключенням є енергорозподільча компанія ПАТ «Чернігівобленерго», в кожному із районів електричних мереж (РЕМ) якої налагоджена така робота.

Інформація по виявлених дефектах у 21 РЕМ збирається обслуговуючим персоналом під час періодичних і позачергових оглядів та заноситься до так званих листків огляду з подальшою систематизацією по структурному підрозділу у журналі дефектів.

Для дослідження розподілу пошкоджень по видам та їх впливу на показники надійності електропостачання споживачів отримана ретроспективна інформація із РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» за 2012-2017 роки. Зазначена інформація була оброблена із розбивкою на найбільш масові види пошкоджень:

- пошкодження штирьової ізоляції;
- обрив проводу (або в'язки проводу до ізолятора);
- пробій вентиляційного розрядника;
- інші причини;
- не виявлено (пошкодження самоусунулися після автоматичного повторного включення (АПВ) та ручного включення (РПВ)).

До інших причин віднесені поодинокі знеструмлення електричної мережі із-за:

- падіння опор;
- пошкодження траверси;
- пошкодження трансформаторів струму;
- пошкодження кабельних вставок;
- пошкодження силового трансформатора на ТП 10/0,4кВ;
- пошкоджень в абонентській мережі;
- птахів та диких тварин.

Оскільки на балансі деяких РЕМ (Ніжинський, Прилуцький) є значна кількість КЛ, що проходять по містах, то під час аналізу ретроспективної інформації вони були виключені з розгляду.

Основним технічним показником, який характеризує експлуатаційну надійність електричної мережі та надійність електропостачання споживачів є кількість знеструмлень електричних мереж за рік експлуатації. На рис. 1 зображено розподіл загальної кількості знеструмлень, які викликані ОЗЗ в мережах 6-10кВ по РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго».

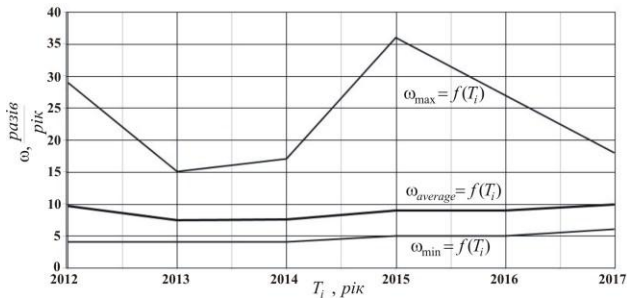


Рис. 1 – Розподіл загальної кількості знеструмлень, які викликані ОЗЗ по РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго»

З рис. 1 видно, що мінімальна кількість знеструмлень, що викликані ОЗЗ, на один РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» з 2012 по 2017 рік змінювалася у вузькому діапазоні від 4 до 6 відкл/рік, а максимальне значення – в доволі широкому діапазоні від 15 до 36 відкл/рік. Середнє значення кількості знеструмлень за всіма РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» є більш стабільним в часі та знаходиться в діапазоні від 7,4 до 9,9 відкл/рік.

За отриманими показниками можна стверджувати, що електричні мережі відпрацювали свій нормативний термін експлуатації та потребують реконструкції, а подекуди і повної заміни [8].

Як відомо кількість знеструмлень в розподільних мережах пов'язана з їх довжиною, а саме зі збільшенням довжини зростає кількість пошкоджень [9,10]. Оскільки на балансі кожного РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» знаходиться різна довжина ПЛ 6-10 кВ, то для якісного аналізу статистичної інформації побудовано залежність кількості знеструмлень, які віднесені до сумарної довжини ПЛ 6-10кВ по кожному з РЕМ (див. рис. 2).

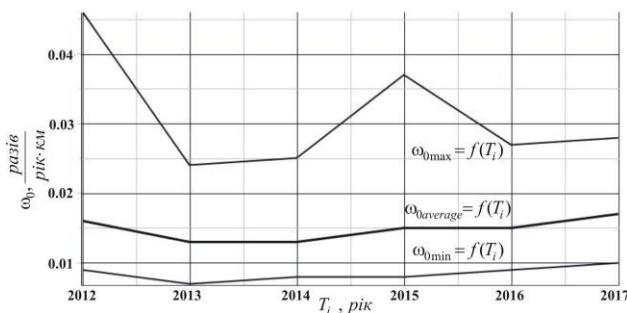


Рис. 2 – Розподіл загальної кількості знеструмлень, що віднесені до 1км ПЛ 6-10кВ, які викликані ОЗЗ по РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго»

З рис. 2 видно, що середнє питоме значення кількості знеструмлень через ОЗЗ по мережах розподільній компанії ПАТ «Чернігівобленерго» є майже стабільним та знаходиться в діапазоні 0,013-0,017 разів/(рік-км). Найкращі показники по питомій кількості відключень, що викликані пошкодженнями під час ОЗЗ, мають Козелецький, Прилуцький, Н.Сіверський, Ніжинський та Бахмацький РЕМ (біля

0,01 разів/(рік-км)), а найгірші – Чернігівський, Срібнянський, Борзнянський та Варвинський (біля 0,022 разів/(рік-км)). Тобто найгірший показник перевищує найкращий у 2,2 рази.

На рис. 3 зображено розподіл за видами загальної кількості знеструмлень ПЛ 6-10кВ, які викликані ОЗЗ по усім РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго».

З рис. 3 видно, що найбільша кількість знеструмлень, які викликані ОЗЗ, по ПАТ «Чернігівобленерго» припадає на пошкодження штирьової ізоляції повітряних ліній 6-10кВ (в середньому 46,8% від загальної кількості за 6 років).

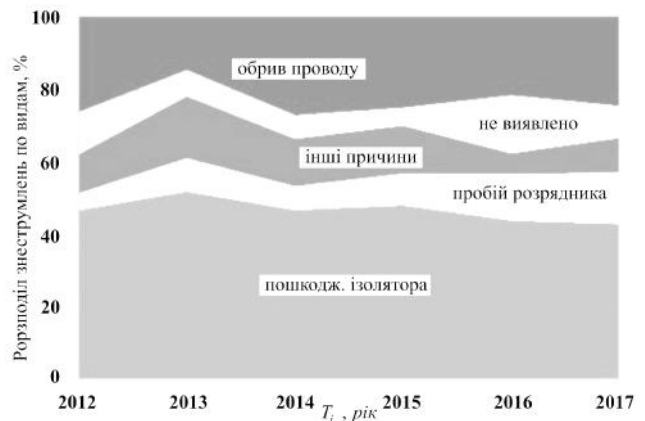


Рис. 3 – Розподіл за видами загальної кількості знеструмлень ПЛ 6-10кВ з 2012 по 2017 роки, які викликані ОЗЗ по усім РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго»

Другою основною причиною пошкоджень є обриви проводу та в'язок проводу до ізоляторів ПЛ, яка в середньому призводить до 23,3% знеструмлень. Найменша кількість знеструмлень припадає на пошкодження розрядників, інших другорядних причин (зазначені вище) та невиявлених причин з розподілом 9,2%, 11,7% та 9,0% відповідно (див. рис. 4).

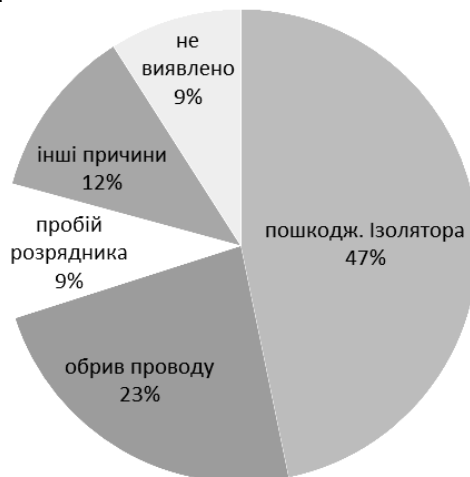


Рис. 4 – Усереднений за шість років розподіл за видами знеструмлень ПЛ 6-10кВ, які викликані ОЗЗ по ПАТ «Чернігівобленерго»

Аналіз ретроспективних даних по пошкодженням в різних РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» вказує на те, що найбільша кількість пошкоджень ізоляції від загальної сукупності пошкоджень спостерігається у Варвинському, Срібнянському, Городнянському та Ріпкинському РЕМ (78%, 62,5%, 61,6% та 59,1% відповідно від загальної сукупності пошкоджень), а найменша – Ніжинському, Чернігівському та Носівському РЕМ (34,7%, 34,8% та 36,8% відповідно від загальної сукупності пошкоджень).

Згідно з діючих норм середня тривалість пошуку ОЗЗ в мережах 6-10кВ у більшості випадків не повинна перевищувати 2 годин, проте статистика по ПАТ «Чернігівобленерго» показує, що такі пошкодження можуть шукатися і значно більший час. Подекуди час пошуку може сягати і декількох діб. Це викликано тим, що більшість пошкоджень, пов'язаних із пробоем штирьової ізоляції, після утворення можуть самоусуватися, а потім знову виникати. Тому експлуатаційний персонал не встигає знайти такі пошкодження «традиційними» способами, що використовуються в експлуатації, що погіршує експлуатаційні показники надійності, приводячи, в деяких випадках, до переходу ОЗЗ у міжфазні замикання із подальшим знеструмленням споживачів електричної енергії [11,12].

Інтегральним показником надійності електропостачання споживачів вважається показник недовідпуску електричної енергії [4,6,13], який розраховується за формулою:

$$\Delta W = \bar{P} \cdot \omega \cdot \tau, \quad (1)$$

де \bar{P} – середня потужність споживачів, кВт;

ω – частота знеструмлень споживачі, відкл/рік (в нашому випадку стосується знеструмлень, які викликані пошкодженням ПЛ 6-10 кВ під час ОЗЗ);

τ – середня тривалість відновлення електропостачання, годин.

У табл.1 наведено розподіл недовідпуску електричної енергії споживачам за видами пошкоджень ПЛ 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго», які викликані ОЗЗ, а табл. 2 – недовідпуск

електричної енергії по РЕМ ПАТ «Чернігівобленерго» із-за пошкодження ізоляторів.

З табл. 1 видно, що найбільший середньорічний недовідпуск електричної енергії спостерігається при пошкодженнях штирьової ізоляції ПЛ 6-10 кВ і сягає 45,9% від загального середньорічного недовідпуску, що у іменованих одиницях становить 21,263 МВт-год/рік. Найбільші середньорічні значення недовідпуску електричної енергії спостерігаються по Чернігівському, Корюківському та Ніжинському РЕМ і складають 3,802, 1,925 та 1,465 МВт-год/рік (див. табл.2). Зіставляючи дані в табл.2 з сумарними довжинами ПЛ 6-10 кВ по РЕМ можна бачити, що найбільший середньорічний недовідпуск віднесений до 1км довжини спостерігається у Чернігівському РЕМ – 3,9 кВт-год/рік, а найменший у Прилуцькому, Носівському і Бахмацькому – 0,7; 0,8 і 0,8 кВт-год/рік відповідно. Це пов'язано з тим, що більшість електричних мереж 6-10 кВ у Чернігівському РЕМ збудовані набагато раніше, ніж у Прилуцькому, Носівському і Бахмацькому.

Недовідпуски електричної енергії споживачам, які наведені в табл. 2, є орієнтовними, оскільки визначаються експлуатаційним персоналом за навантаженням, яке передувало знеструмленню. Проте за час знеструмлення навантаження могло дещо змінитися, відповідно зміниться і недовідпуск електричної енергії. Найбільш правильним підходом щодо визначення недовідпуску електричної енергії є прогнозування графіка навантаження на фідері, який відключається. Один з таких підходів викладений у [14].

В даній час на підстанціях 35-110 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» активно запроваджується автоматизована система управління технологічними процесами на базі Місго SCADA фірми АВВ, яка після реалізації алгоритму прогнозування дозволить більш точно визначати недовідпуски електричної енергії споживачам.

Тривалість знеструмлення споживачів, викликана ОЗЗ, розрахована за формулою:

$$\theta_{np} = \frac{\Delta W}{P}. \quad (2)$$

Таблиця 1 – Розподіл недовідпуску електричної енергії по причинах знеструмлення за 2012-2017 роки

Причина пошкодження	Недовідпуск електричної енергії, МВт-год/рік у році						Середньорічний недовідпуск електричної енергії	
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	МВт-год/рік	%
Пошкодження ізолятора	23,465	18,44	15,64	25,71	20,51	23,81	21,263	45,9
Обрив проводу	11,947	2,34	10,857	14,096	14,106	13,39	11,123	24,0
Пробій розрядника	1,311	7,8	1,11	3,82	5,66	7,66	4,560	9,8
Інші причини	6,429	5,62	2,81	4,613	4,06	4,31	4,640	10,0
Не виявлено	5,951	1,05	3	1,17	12,093	5,234	4,750	10,3

Таблиця 2 – Недовідпуск електричної енергії по РЕМ з 2012 по 2017 роки через пошкодження ізоляторів

Назва РЕМ	Недовідпуск електричної енергії через пошкодження ізоляторів							
	значення у МВт·год/рік у році						середньорічне значення	
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	МВт·год/рік	%
Бахмацький	0,293	0,43	0,38	1,1	0,5	1,03	0,622	2,9
Бобровицький	1,4	0,82	0,81	1,1	1,11	1,04	1,047	4,9
Борзнянський	0,96	0,73	0,05	1,3	0,98	0,45	0,745	3,5
Варвинський	0,25	0,31	2,1	0,43	0,53	0,39	0,668	3,1
Городнянський	0,972	0,87	0,81	0,89	0,86	1,1	0,917	4,3
Ічнянський	0,67	0,93	0,83	0,64	1,54	1,32	0,988	4,6
Козелецький	1,71	1,5	1,06	1,12	1,74	1,34	1,412	6,6
Коропський	0,23	0,51	0,72	0,21	0,35	1,3	0,553	2,6
Корюківський	3,45	2,1	0,89	1,74	2,57	0,8	1,925	9,1
Куликівський	0,87	0,18	0,27	0,35	0,62	1,1	0,565	2,7
Менський	0,78	3,33	1,43	1,63	0,23	1,2	1,433	6,7
Н-Сіверський	0,78	0,32	0,51	0,45	1,2	1,32	0,763	3,6
Ніжинський	1,27	1,12	0,53	0,14	0,21	5,52	1,465	6,9
Носівський	0,23	0,15	0	1,1	0,2	0,43	0,352	1,7
Прилуцький	0,43	0,1	0,59	0,43	1,34	0,82	0,618	2,9
Ріпкинський	1,03	0,94	1,9	1,43	0,32	0,98	1,100	5,2
Семенівський	1,33	0,57	0,09	0,54	1,22	0,42	0,695	3,3
Срібнянський	0,32	0,45	0,54	0,52	0,34	0,45	0,437	2,1
Талалаївський	0,19	0,42	0,51	0,29	0,94	0,87	0,537	2,5
Чернігівський	5,87	2,12	1,34	9,87	2,29	1,32	3,802	17,9
Щорський	0,43	0,54	0,28	0,43	1,42	0,61	0,618	2,9

Розрахунки показують, що середнє значення тривалості одного знеструмлення, яке викликане тільки ОЗЗ, складає біля 1,2 год/(рік-відкл), що суттєво погіршує такий показник надійності електропостачання, як SAIDI [4]. Слід зазначити, що за 2018 рік середнє значення показника SAIDI (який включає тривалості знеструмлень як під час ОЗЗ, так і під час міжфазних замикань) для країн ЄС склало 72,04 хвилини/рік, що значно менше показника для вітчизняних мереж на одне відключення тільки під час ОЗЗ.

З вищезазначеного видно, що для поліпшення надійності електропостачання споживачів у мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» та для доведення показників надійності до величин, що не перевищують регламентовані Національною Комісією, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг, необхідно в першу чергу зменшити тривалість знеструмлень, пов'язаних з пошуком пошкодженої ізоляції під час ОЗЗ. Один з найменш витратних способів, що дозволяє зменшити тривалість таких знеструмлень викладено у [7,15].

Висновки

Проведений аналіз ретроспективної інформації з 2012 по 2017 роки по відмовам, викликаним ОЗЗ в

мережах 6-10кВ ПАТ «Чернігівобленерго» показав, що найбільша кількість знеструмлень виникає через пошкодження штирьової ізоляції (46,8%). Другою основною причиною є обриви проводу та в'язок проводу до ізоляторів ПЛ (23,3%).

Встановлено, що найбільший середньорічний недовідпуск електричної енергії спостерігається також при пошкодженнях штирьової ізоляції ПЛ 6-10 кВ і сягає 45,9% від загального середньорічного недовідпуску, що у іменованих одиницях становить 21,2 МВт·год/рік. Середнє значення тривалості одного знеструмлення, яке викликане тільки ОЗЗ, складає біля 1,2 год/(рік-відкл), що суттєво погіршує такий показник надійності електропостачання, як SAIDI.

Для поліпшення надійності електропостачання споживачів у мережах 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» та для доведення показників надійності до величин до регламентованих нормативів необхідно в першу чергу слід застосовувати методи, що зменшать кількість та тривалість знеструмлень, пов'язаних з пошуком пошкодженої ізоляції під час ОЗЗ.

Список літератури

1. Стафійчук, В. Г. Посібник з вивчення правил улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи електробезпеки / В. Г. Стафійчук, В. Г. Сантоцький, І.

Я. Капець, А. О. Квіцинський. – К.: «АСЕЛЕНЕРГО», 2008. – 156 с.

2. **Chowdhury, Ali A.** Power distribution system reliability. Practical Methods and Applications / **Ali A. Chowdhury, Don O. Koval.** IEEE Press, 2009. – 531 p.
3. **Циганенко, Б. В.** Перспективи переведення розподільних мереж України на номінальну напругу 20 кВ / **Б. В. Циганенко** // *Наукові праці ВНТУ.* – 2016. – №1. – С. 1-4.
4. **Ali, K.** Reliability Analysis of Power Distribution System / **K. Ali, R. Syahputra, R.O. Wiyagi** // *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY).* – 2017. – V.1, Issue 2. – P. 67-74.
5. **Billinton, R.** Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation / **R. Billinton, P. Wang** // *Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings.* – 1998. – Vol. 145. – P. 149-153. – doi: 10.1049/ip-gtd:19981828.
6. **Буйний, Р. О.** Автоматичне секціонування розподільних електричних мереж напругою 6–10 кВ із застосуванням роз'єднувачів нового покоління / **Р. О. Буйний, І. В. Діхтярук, В. В. Зорін** // *Технічна електродинаміка.* – 2014. – № 3. – С. 70-75.
7. **Безручко, В. М.** Використання GSM технологій при ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю зі штирровою ізоляцією / **В. М. Безручко, Р. О. Буйний, А. Ю. Строгий, В. І. Ткач** // *Технічна електродинаміка.* – 2018. – 5. – С. 96-99. – doi: 10.15407/techned2018.05.096.
8. **СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576.** Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільчих мереж напругою 0,38–20 кВ з повітряними лініями електропередачі – К.: *ОЕП «ГРІФРЕ»*, 2005. – 92 с.
9. **Gilvanejad, M.** A methodology to include real-life failure data in the failure rate estimation of power distribution systems / **M. Gilvanejad, H. Askarian Abyaneh, K. Mazlumi** // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences.* – 2017. – Vol. 25. – P. 1082-1094. – doi: 10.3906/elk-1509-5.
10. **Balijepalli, N.** Modeling and analysis of distribution reliability indices / **N. Balijepalli, S. S. Venkata, R. D. Christie** // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – 2004. – Vol. 19. – P. 1950-1955. – doi: 10.1109/TPWRD.2004.829144.
11. **Bayliss, C. R.** Transmission and Distribution Electrical Engineering / **C. R. Bayliss, B. J. Hardy.** – Elsevier Ltd, 2007. – 1040 p.
12. **Das, D.** Electrical Power Systems / **D. Das.** – New Age International Publishers, 2006. – 484 p.
13. **Діхтярук, І. В.** Визначення раціональних місць встановлення автоматичних секціонуючих роз'єднувачів в розподільних мережах напругою 10 кВ / **І. В. Діхтярук** // *Технічна електродинаміка.* – 2014. – №4. – С. 53-54.
14. **Sun, X.** An Efficient Approach to Short-Term Load Forecasting at the Distribution Level / **X. Sun, P. B. Luh, K. W. Cheung, et al.** // *IEEE Transactions on Power Systems.* – 2016. – Vol. 31. – P. 2526-2537. – doi: 10.1109/TPWRS.2015.2489679.
15. **Bezruchko, V.** Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems / **V. Bezruchko, R. Buinyi, A. Strogii, V. Tkach** // *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), IEEE Proceedings.* – 2019. – P. 84-87. – doi: 10.1109/ESS.2019.8764237.

References (transliterated)

1. **Stafiichuk, V. H., Santotskyi, V. H., Kapets, I. Ia., Kvitvynskyi, A. O.** Posibnyk z vyvchennia pravyl ulashtuvannia elektroustanovok. Rozdil 1. Zahalni pravyla. Hlava 1.7 Zazemlennia i zakhysni zakhody elektrobezpeky [Guide for the study of electrical installation rules. Section 1 General rules. Chapter 1.7 Grounding and protective measures of electrical safety]. Kyiv: ASELENERHO, 2008, 156.
2. **Ali, A., Chowdhury, Koval, Don O.** Power distribution system reliability. Practical Methods and Applications. IEEE Press, 2009, 531.
3. **Tsyhanenko, B. V.** Perspektyvy perevedennia rozpodilnykh merezh Ukrainy na nominalnu napruhu 20 kV [Prospects for the transfer of distribution networks in Ukraine rated voltage 20 kV]. *Naukovi pratsi VNTU [Scientific works of VNTU]*, 2016, **1**, 1-4.
4. **Ali, K., Syahputra, R., Wiyagi, R. O.** Reliability Analysis of Power Distribution System. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 2017, **1(2)**, 67-74.
5. **Billinton, R., Wang, P.** Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. *Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings*, 1998, **145**, 149-153, doi: 10.1049/ip-gtd:19981828.
6. **Buinyi, R., Dikhtyaruk, I., Zorin, V.** Avtomatychnе seksionuvannia rozpodilnykh elektrychnykh merezh napruhoiu 6–10 kV iz zastosuvanniam roziednuvachiv novoho pokolinnia [The automatic sectionalization of the distributing networks with high voltage of 6 10 kV with application the disconnectors of new generation]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamic]*, 2014, **3**, 70-75.
7. **Bezruchko, V. M., Buinyi, R. O., Strohii, A. Iu., Tkach, V. I.** Vykorystannia GSM tekhnolohii pry identyfikatsii mistis odnofaznykh zamykan na zemliu v elektrychnykh merezhakh z izolovanoiui neutralliu zi shtyrovoiu izoliatsiieiu [Application of GSM technology for identification of phase-to-ground faults in electric networks with isolated neutral and pin-type isolation]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamic]*, 2018, **5**, 96-99, doi: 10.15407/techned2018.05.096.
8. **SOU-N MPE 40.1.20.576.** Metodichni vkazivky z obliku ta analizu v enerhosystemakh tekhnichnoho stanu rozpodilnykh merezh napruhoiu 0,38-20 kV z povitrianymy liniyamy elektropredachi [Methodical instructions for the accounting and analysis in the power systems of the technical state of distribution networks with voltage 0,38-20 kV with air lines of power transmission]. Kyiv: OEP «HRIFRE», 2005, 92.
9. **Gilvanejad, M., Askarian Abyaneh, H., Mazlumi, K.** A methodology to include real-life failure data in the failure rate estimation of power distribution systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017, **25**, 1082-1094, doi: 10.3906/elk-1509-5.
10. **Balijepalli, N., Venkata, S. S., Christie, R. D.** Modeling and analysis of distribution reliability indices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, **19**, 1950-1955, doi: 10.1109/TPWRD.2004.829144.
11. **Bayliss, C. R., Hardy, B. J.** Transmission and Distribution Electrical Engineering. Third Edition. *Elsevier Ltd*, 2007, 1040.
12. **Das, D.** Electrical Power Systems. New Age International Publishers, 2006, 484.

13. **Dikhtyaruk, I. V.** Vyznachennia ratsionalnykh mistv vstanovlennia avtomatychnykh sektionuiuchykh roziednuvachiv v rozpodilnykh merezhakh napruhoiu 10 kV [Definition of rational installation location of automatic partitioning switching devices in the distribution networks with the voltage of 10 kV]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2014, 4, 53-54.
14. **Sun, X., Luh, P. B., Cheung, K. W., et al.** An Efficient Approach to Short-Term Load Forecasting at the Distribution Level. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31, 2526-2537, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2489679.
15. **Bezruchko, V., Buinyi, R., Strogii, A., Tkach, V.** Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), IEEE Proceedings*, 2019, 84-87, doi: 10.1109/ESS.2019.8764237.

Відомості про авторів (About authors)

Ткач Володимир Іванович – ПАТ «Чернігівобленерго», інженер відділу перспективного розвитку, м. Чернігів, Україна; e-mail: v.tkach1972@gmail.com.

Volodymyr Tkach – PJSC «Chernihivoblenergo», engineer of the department of perspective development, Chernihiv, Ukraine; e-mail: v.tkach1972@gmail.com.

Безручко Вячеслав Михайлович – кандидат технічних наук, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж, м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0002-3705-8543; e-mail: slavajm@meta.ua.

Vlacheslav Bezruchko – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3705-8543; e-mail: slavajm@meta.ua.

Буйний Роман Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, доцент кафедри електричних систем і мереж, м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0002-5432-2924; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

Roman Buinyi – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor, Department of Electrical Power Systems and Networks, Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5432-2924; e-mail: buinyiroman@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ткач, В. І. Вплив однофазних замикань на землю на експлуатаційні показники надійності повітряних ліній 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго» / **В. І. Ткач, В. М. Безручко, Р. О. Буйний** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 120-126. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14.

Please cite this article as:

Tkach, V., Bezruchko, V., Buinyi, R. The effect of single-phase-to-ground faults on the operational reliability indicators of overhead lines 6-10 kV PJSC «Chernihivoblenergo». *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 1, 120-126, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ткач, В. И. Влияние однофазных замыканий на землю на эксплуатационные показатели надежности воздушных линий 6-10 кВ ПАО «Черниговоблэнерго» / **В. И. Ткач, В. М. Безручко, Р. А. Буйный** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 1. – С. 120-126. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.14.

АННОТАЦІЯ Однофазні замикання на землю в сетях с изолированной нейтралью приводят к образованию ненормального режима работы сети и, в большинстве случаев, переходят в короткие замыкания, вызывая отключения потребителей и ухудшая показатели надежности электроснабжения. Особенно актуальной эта проблема является в сетях 6-10кВ операторов систем распределения в Украине и постсоветских странах, в которых большинство сетей состоят из разветвленных воздушных линий электропередачи. Не исключением является и сети ПАО «Черниговоблэнерго». Существует много путей улучшения показателей надежности. Одни пути направлены на повышение структурной надежности электрической сети, а другие - надежности электроснабжения. Как правило, первые должны применяться для новых электрических сетей, а вторые - для существующих, находящихся в эксплуатации. Следует отметить, что в ПАО «Черниговоблэнерго» вышеуказанные электрические сети эксплуатируются более 50 лет. В условиях отсутствия инвестиций для полной замены существующих электрических сетей должны применяться такие пути, которые будут наименее затратными и наиболее эффективными. Для их обоснованного выбора необходимо знать распределение видов повреждений в таких сетях и их влияние на эксплуатационные показатели надежности. В работе проанализирована статистическая информация по однофазным замыканиям на землю в электрических сетях 6-10 кВ всех структурных подразделений ПАО «Черниговоблэнерго» с 2012 по 2017 годы. Установлено, что наибольшее количество отключений приходится на повреждения штыревой изоляции (46,8% от общего количества) и вызывает среднегодовой недоотпуск электрической энергии 21,263 МВт·ч/год (45,9% от общего среднегодового недоотпуска). При этом среднее время одного отключения, вызванное только замыканиями на землю, составляет около 1,2 ч/(год·откл), что превышает допустимые нормы. Показано, что для улучшения надежности электроснабжения потребителей в сетях 6-10 кВ ПАО «Черниговоблэнерго» необходимо, в первую очередь, уменьшить продолжительность отключений, связанных с поиском поврежденной изоляции при однофазных замыканиях на землю.

Ключевые слова: распределительная сеть; изолированная нейтраль; воздушная линия, замыкания на землю; штыревая изоляция; надежность электроснабжения; обесточивание

Поступила (received) 28.08.2019

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Воловецький В. Б., Щирба О. М.</i> Дослідження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів	3
<i>Волощенко С. М., Гогасєв К. О., Аскеров М. Г., Міропольський А. М.</i> Можливості імпортозаміщення змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки литими виробами з високоміцного бейнітного чавуну	14
<i>Зайцев Р. В., Мінакова К. О.</i> Огляд ринку сонячної енергетики України: стан та комерційні перспективи	20
<i>Мамонтов А. Г., Кожушко А. П., Ребров О. Ю.</i> Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом	29
<i>Нонніг Дж., Вісенхьютер С.</i> Винахідницька інженерія – новий підхід до підтримки творчості в інженерії, практиці та дослідженні	42
<i>Подкопайєв С. В., Іорданов І. В., Сімонова Ю. І., Положий А. В., Довгаль В. Ю., Король А. В.</i> Дослідження на моделях стійкості бічних порід при раптових обваленнях розшарованої товщі	48
<i>Пузыр Р. Г.</i> Моделювання витягування циліндричної деталі без притиску фланця заготовки з ізотропного та анізотропного металу	58

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Гармаш Д. В., Пасічний В. М.</i> Вплив застосування технології sous vide на функціонально-технологічні характеристики продуктів на основі різних видів м'ясної сировини	67
<i>Дзюба Н. А., Сіроцінська Д. А.</i> Проектування полікомпонентних соусів дієтичної спрямованості	75
<i>Трубінова А. А., Чабанова О. Б., Бондар С. М., Шарахматова Т. Є.</i> Одержання сухого безлактозного білково-ліпідного концентрату маслянки	86
<i>Фролова Л. А.</i> Фотокаталітична активність шпінельних феритів $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$), отриманих під дією контактної низькотемпературної нерівноважної плазми	100
<i>Чорний О. О., Кондратов С. О., Сав'як Р. П.</i> Математичне моделювання вивільнення in vivo лікарських препаратів що іонізуються з матричних композиційних таблеток на основі полімерних сполучних	105
<i>Шинкоренко О. І., Костенко М. В., Цейтлін М. А., Райко В. Ф.</i> Дослідження спроможності почергової термічної нейтралізації відходів ракетного палива в одному агрегаті	114

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

<i>Ткач В. І., Безручко В. М., Буйний Р. О.</i> Вплив однофазних замикань на землю на експлуатаційні показники надійності повітряних ліній 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго»	120
--	-----

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Volovetskiy V., Shchyryba O.</i> Investigation of the hydraulic efficiency of gathering gas pipelines	3
<i>Voloshchenko S., Gogaev K., Podrezov Yu., Askerov M., Miropolsky A.</i> Possibilities of import substitution of replaceable parts for soil-cultivating agricultural machinery by parts from high-strength bainitic cast iron	14
<i>Zaitsev R., Minakova K.</i> Overview of the Ukrainian solar market: status and commercial perspectives	20
<i>Mamontov A., Kozhushko A., Rebrov O.</i> Formation of a mathematical model of the dynamic loading of tractor suspension with semi-trailer	29
<i>Noennig J., Wiesenhuetter S.</i> Invention engineering – a novel approach to support creativity in engineering, practice and research	42
<i>Podkopaiev S., Iordanov I., Simonova Y., Polozhiy A., Korol A., Boichenko H.</i> Study on models of stability of side species at extreme damage of a divided thickness	48
<i>Puzyr R.</i> Modeling drawings of a cylinder detail without clipping a working flange from an isotropic and anisotropic metal	58

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Garmash D., Pasichnyi V.** The impact of sous vide technology application on the functional and technological characteristics of products based on different types of meat stuff 67
- Dzyuba N., Sirotsinska D.** Designing of multicomponent sauces of dietary orientations 75
- Trubnikova A., Chabanova O., Bondar S., Sharahmatova T.** Preparation of dry lactose protein-lipid concentrate of buttermilk 86
- Frolova L.** Photocatalytic activity of spinel ferrites $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0,25 < x < 1$) obtained by treatment contact low-temperature nonequilibrium plasma 100
- Chornyi A., Kondratov S., Savyak R.** Development of the recipe for matrix compositions of 2-ethyl-3-methyl-6-hydroxymethylpyridine succinate for tablets of prolonged action based on polymeric bonding 105
- Shinkorenko O., Kostenko M., Tseytin M., Rayko V.** Study of the possibility of sequential thermal neutralization of the rocket fuel waste in one unit 114

ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION

- Tkach V., Bezruchko V., Buinyi R.** The effect of single-phase-to-ground faults on the operational reliability indicators of overhead lines 6-10 kV PJSC «Chernigivoblenreg» 120

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 1' 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.nsmi@gmail.com

Підп. до друку «30» вересня 2019 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 14,0. Облік.вид.арк. 8,75.
Тираж 50 прим. Зам. № 52. 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
