

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2016

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
постановою президії ВАК України
як наукове фахове видання
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ,
член-кор. НАН України

Відповідальний секретар
К. О. Горбунов,
канд. техн. наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф.*,
РХТУ Москва (Росія)
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор*
F. Executive Co. (Великобританія)
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon)*
ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина)
та ун-та Манчестера (Великобританія)
В. Плешу, *PhD, проф.*, *ун-т POLITEHNICA*
Бухарест (Румунія)
П. Стехлік, *PhD, проф.*, *VUT Брно (Чехія)*
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*
П. А. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*
В. П. Шапорєв, *д-р техн. наук, проф.*
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*
С. В. Яковлев, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*
Л. М. Ульянов, *д-р техн. наук*
П. О. Капустєнко, *акад. Академії будівництва України*
О. П. Арсєнєва, *д-р техн. наук, доц.*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Чейлитко А. О., Чейлитко А. А.
Дослідження впливу форми пор на тепловий
опір пористих теплоізоляційних матеріалів..... 3

*Быканов С. Н., Горбунов К. А.,
Горбунова О. В., Ким А. Е.*
Тепловая интеграция процесса выпаривания
едкого натра..... 9

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

*Бобух А. О., Дзєвочко О. М.,
Подустов М. О. Переверзєва А. М.*
Алгоритм стабілізації якісних показників роботи
технологічних процесів абсорбції-десорбції
виробництва кальцинованої соди у реальному
інтервалі часу..... 15

*Редько А. А., Давиденко А. В., Павловський С. В.,
Куликова Н. В., Редько І. А.*
Численное моделирование теплообмена
в топке водотрубного парового котла
ДЕ-10/14 при различной тепловой нагрузке..... 21

*Сєліхов Ю. А., Коцарєнко В. О., Рябова І. Б.,
Горбунов К. О., Хурані Ж. С.*
Використання двоконтурних геліоустановок
для гарячого водопостачання..... 30

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Алексахин А. А., Ена С. В., Гордиенко Е. П.,
Ландар А. А., Бурда О. С.*

К вопросу оценки эффективности
перехода к двухтрубной системе
теплоснабжения.....35

*Левчук І. В., Кіщенко В. А.,
Тимченко В. К., Куниця К. В.*
Удосконалення технології визначення
бенз[а]пірену та суми пав
в рослинних оліях42

Бухкало С. І., Іглін С. П.
Деякі моделі дослідження
структурно-хімічних змін
при експлуатації полімерних виробів52

Лукашев В. К., Онда В. И., Шевцова Т. Н.
Поверхностная модификация
гранулированных нитратов целлюлозы
пластифицирующим веществом..... 58

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Бозбей Л. С., Борц Б. В., Костиков А. О.,
Ткаченко В. И.*
Разрушение ячеек Бенара
при локальных нарушениях теплового
равновесия и их формирование
над ячейками Бенара.....67

*Дубовець О. М., Подустов М. О.,
Литвиненко Є. І., Пугановський О. В.*
Модернізований очисний пристрій..... 80

Сторінка редколегії..... 85

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 7 від 23.09.2016 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3. – 86 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій
різноманітних галузей промисловості.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

3'2016

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України: Серія КВ № 5212 від 18.06.2001 р.

Підп. до друку 19.09.2016 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 прим. 1-й з-д 1–80.
Зам. № 165. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

УДК 62-405.8

Чейлитко А.О., Чейлитко А.А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ПОР НА ТЕПЛОВИЙ ОПІР ПОРИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ. У сучасному світі, де з кожним днем енергетичні ресурси тільки дорожчають, людство дедалі частіше звертається до енергозберігаючих технологій. «Лєвова доля» економії коштів забезпечується завдяки тепловій ізоляції будинків, споруд, трубопроводів, промислового обладнання і т.д. Перспективність використання пористих теплоізоляційних матеріалів у промисловості детально розглянута в [1–3]. Незважаючи на поширеність, жоден з нових теплоізоляційних матеріалів не демонструє вагомого покращення теплофізичних властивостей. Це пов'язано з хибним напрямком розвитку.

У статті [4] описано створення нового пористого теплоізоляційного жароміцного матеріалу на основі композиційного в'язучого та газоутворювача. Але у статті не наведено теплотехнічних показників отриманого матеріалу, та не описується можливість регулювання пористості. А пористість (кількість, розмір та форма пор) як відомо буде впливати на ефективну теплопровідність матеріалу [5].

У статті [6] розглядається створення нового високо пористого теплоізоляційного матеріалу на основі мінеральної сировини. У даній роботі ретельно проаналізовано хімічний склад матеріалу та проведено ряд експериментів з дослідження міцності цього матеріалу. Однак не було представлено даних щодо теплопровідності отриманого матеріалу. Не кажучи вже про структуру пористості.

У [7] наведена класифікація пористих теплоізоляційних матеріалів. Розглянуто різноманітні способи дослідження цих матеріалів та вплив пористості на теплопровідність. Однак не було приділено належної уваги впливу параметрів пористості, а саме форми, розміру та способу розташування пор.

Дослідження впливу форми пор близьких до сфери на теплопровідність

У якості експериментальних зразків було використано пластини з наступною формою отворів: коло; шестикутник; квадрат; рівнобічний трикутник; витягнутий еліпс. Отвори були розташовані у коридорному та шаховому порядках. Еліпс було розміщено більшою діагоналлю перпендикулярно тепловому потоку. Площа поперечного перерізу для всіх форм була однаковою. Методом дослідження слугував метод комп'ютерного моделювання у програмі Ansys. Такий вибір обумовлено складністю виготовлення фізичних моделей зразків з точною формою отворів та їх розташуванням.

Функцією Mesh кожен зразок було розділено більш ніж на 249 000 елементів. При моделюванні теплового процесу було задано наступні параметри: тепловий потік – 0,1 Вт; час нагріву – 1 с; температура навколишнього середовища та зразку – 20 °С; коефіцієнт тепловіддачі – 23 Вт/м²·К. Поверхня нагріву та конвективна поверхня були розташовані з протилежних сторін зразка. Коефіцієнт теплопровідності дослідженого матеріалу 0,1 Вт/(м·К).

За допомогою проведених експериментів було побудовано відношення теплопровідності дослідних зразків з різною формою отворів до теплопровідності зразків з формою отворів у вигляді кола (рис. 1). Згідно з результатами різниця коефіцієнту теп-

лопровідності зразків з еліпсом та колом склала 27 %. Найменша теплопровідність отримана в зразках з витягнутим еліпсом через те, що при такій формі та способі розташування досягається найменша відстань між порами, а це в свою чергу призводить до максимального розсіювання теплової енергії.

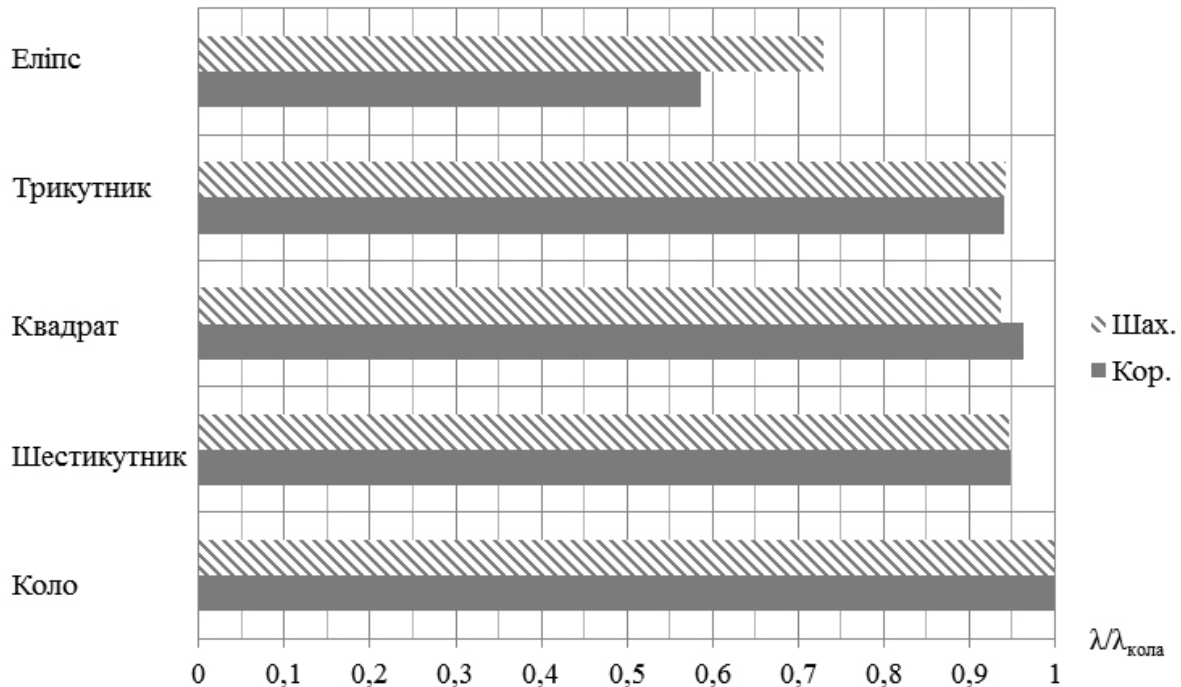


Рисунок 1 – Відношення теплопровідності дослідних зразків з різною формою отворів до теплопровідності зразків з формою отворів у вигляді кола

Комп’ютерне моделювання пористого теплоізоляційного матеріалу

Експериментально доведено (рис. 1), що форми пор близькі до сфери, дають практично однаковий коефіцієнт ефективної теплопровідності матеріалу. Найбільшу різницю у коефіцієнті ефективної теплопровідності, а значить й у термічному опорі матеріалу, дають еліптичні пори розташовані більшим діаметром перпендикулярно до теплового потоку. Однак не було розглянуто вплив кутів нахилу найбільшого діаметру еліптичних пор. Тому необхідно визначитись з впливом кута нахилу еліптичної пори до теплового потоку.

Були побудовані 3Д моделі теплоізолюючого матеріалу з порами. В якості моделі було вибрано куб зі сторонами 0,1 м. В якості пор – еліпс з розмірами діаметрів 7x3 мм. Довжина пори – 14 мм. Сітка вибиралася тетраедна з функцією FaceMesh на зовнішній поверхні. Також була включена функція автоматичного зменшення сітки поблизу пор. Теплоізоляційний матеріал задавався з коефіцієнтом теплопровідності 0,036 Вт/(м·К).

Пори – замкнуті, наповнені повітрям з атмосферним тиском. Початкова температура приймалася 20 °С. Коефіцієнт теплопровідності повітря задавався 0,026 Вт/(м·К). Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу задавався 0,036 Вт/(м·К). Сітка на пори наносилася окремо автоматичним методом. Пори з нанесеною сіткою відображені на рис. 2.

Було досліджено зміну теплового опору теплоізоляційного пористого матеріалу в залежності від зміни повороту пор по відношенню до теплового потоку. Будувалися моделі з кутом повороту більшим діаметром до теплового потоку від 0° (рис. 3) до 90° з шагом у 10° . При 0° еліптичні пори розташовувались вздовж теплового потоку, а при 9° – перпендикулярно.

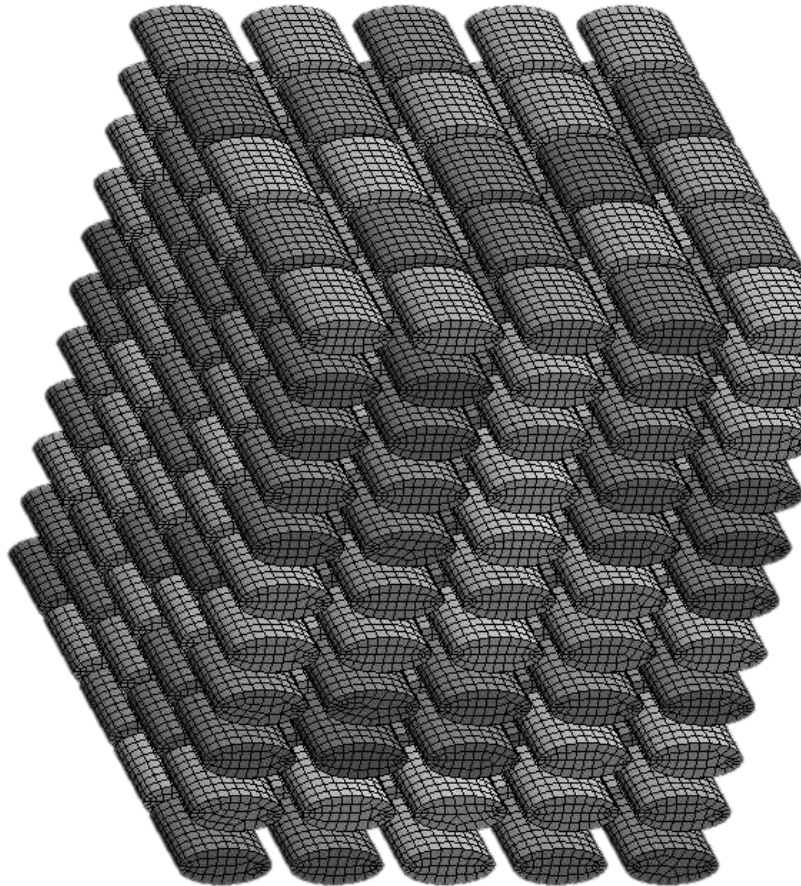


Рисунок 2 – Комп'ютерна модель пор в матеріалі з нанесеною сіткою

Тепловий потік 100 Вт/м^2 підводився до однієї поверхні. Протилежна поверхня охолоджувалась шляхом природної конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Результати досліджень зміни кута нахилу пор у матеріалі

Результати досліджень відображені на рисунку 3. Як можна побачити з цього рисунку, зміна теплового опору теплоізоляційного матеріалу від кута нахилу еліптичних пор описується поліномом другого ступеню.

По результатам моделювання видно, що в теплоізоляційному матеріалі при розташуванні еліптичних пор вздовж теплового потоку тепловий опір менший за теплоізоляційний матеріал з порами перпендикулярно тепловому потоку на $1,38\%$. Ефективний коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу з порами розташованими перпендикулярно тепловому потоку склав $0,03222 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а з порами вздовж теплового потоку – $0,03267$.

Раніше було доведено, що формами пор які дають найбільшу зміну коефіцієнта теплопровідності є еліпс розташований вздовж теплового потоку й еліпс розташований перпендикулярно тепловому потоку. З рис. 3 можна стверджувати, що при габаритному розмірі пори 7 мм зміни теплового опору теплоізоляційного матеріалу в залежності від форми пори не суттєві, та не перевищують 1,38 %. Це пов'язано з низьким коефіцієнтом теплопровідності матеріалу та з низькою конвекцією у порах.

Висновки. При габаритному розмірі пори 7 мм зміни теплового опору теплоізоляційного матеріалу в залежності від форми пори не суттєві, та не перевищують 1,38 % (при закритих порах). Це пов'язано з низьким коефіцієнтом теплопровідності матеріалу та з низькою конвекцією у порах. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що суттєве покращення теплофізичних властивостей пористих теплоізоляційних теплоізоляційних матеріалів не можливе шляхом варіювання формою пор, за умови невеликого розміру цих пор. Отже у подальших дослідженнях слід проаналізувати вплив форми пор з суттєво більшими розмірами та особливо зосередити увагу на впливі розташування пор на теплопровідність теплоізоляційного матеріалу.

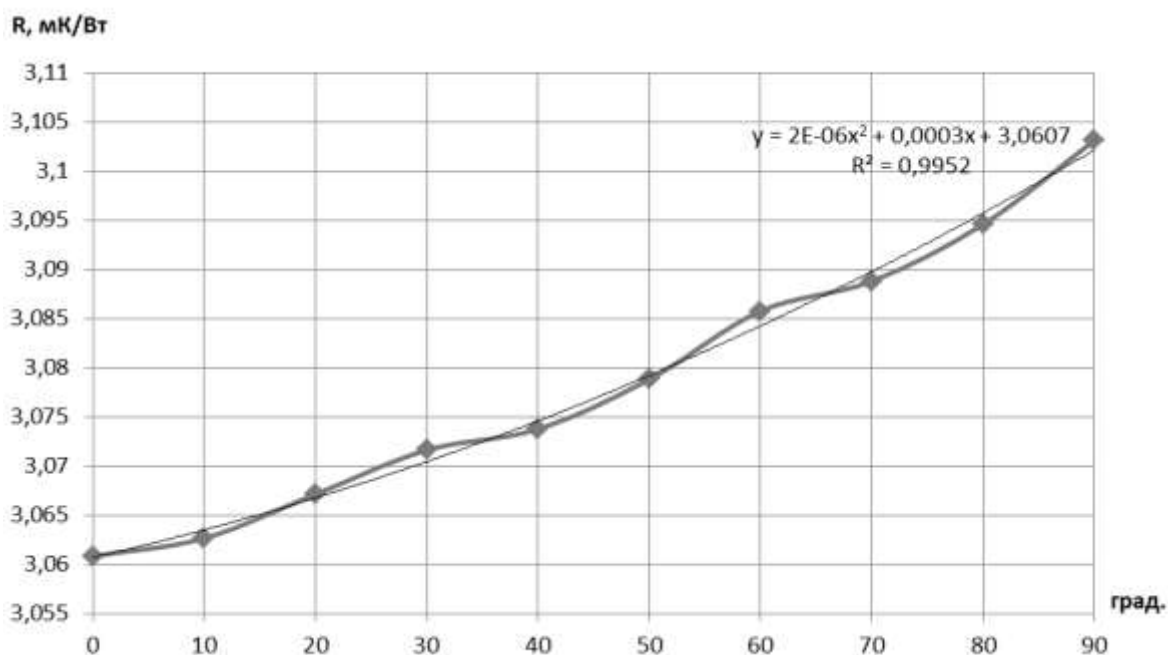


Рисунок 3 – Тепловий опір пористого теплоізоляційного матеріалу при різному куті нахилу еліптичних пор до теплового потоку

Література

1. Fiedler T. Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials / T. Fiedler, E. Pesetskaya, A. Öchsner, J. Grácio // Division of Mechanical Engineering, Univesity of Aveiro, Aveiro, Aveiro, Portugal: Materials Science Forum, 2006. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.754.

2. Nakajima H. Fabrication of porous aluminium with directional pores through thermal decomposition method [Electronic resource] / H. Nakajima, S.Y. Kim, J.S. Park // Journal of Physics: Conference Series 165, 2009, doi:10.1088/1742-6596/165/1/012063, Available at: <http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/165/1>.
3. Komissarchuk O., Xu Z., Hao H. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys [Electronic resource] / China Foundry. – China. – 2014. – Available at: <https://doaj.org/article/002c72e2e01345db8bf4fef190113057>.
4. Мизюрязев С.А. Теплоизоляционный пористый материал / Мизюрязев С.А., Царева А.Н., Нечаева Н.Н., Юмангулова А.Ю. // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии. – Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, – 2016, – С. 102–106.
5. Чейлытко А.О. Дослідження можливості зміни коефіцієнту теплопровідності металів шляхом зміни розмірів та розташування пор / А.О. Чейлытко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2016. – № 2– С. 82–89.
6. Mestnikov A. Thermal highly porous insulation materials made of mineral raw materials / A. Mestnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2014. DOI:10.1088/1757-899X/71/1/012014.
7. Volfkovich Y. Structural properties of porous materials and powders used in different fields of science and technology / Y. Volfkovich, Filippov A., Bagotsky V. // Springer-Verlag London, 2014. DOI 10.1007/978-1-4471-6377-0.

Bibliography (transliterated)

1. Fiedler T., Pesetskaya E., Öchsner A., Grácio J., (2006). Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials. Division of Mechanical Engineering.: Materials Science Forum. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.754.
2. Nakajima H., Kim S.Y., Park J.S., (2009). Fabrication of porous aluminium with directional pores through thermal decomposition method. Journal of Physics: Conference Series 165, doi:10.1088/1742-6596/165/1/012063, Available at: <http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/165/1>.
3. Komissarchuk O., Xu Z., Hao H. Pore structure and mechanical properties of directionally solidified porous aluminum alloys [Electronic resource] / China Foundry. – China. – 2014. – Available at: <https://doaj.org/article/002c72e2e01345db8bf4fef190113057>.
4. Mizjurjaev S.A. Teploizoljacionnyj poristyj material / Mizjurjaev S.A., Careva A.N., Nechaeva N.N., Jumangulova A.Ju. // Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'nye tehnologii. – Samara: Samarskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, – 2016, – p. 102–106.
5. Cheylytko A.O. Doslidzhennya mozhlyvosti zminy koefitsiyentu teploprovodnosti metaliv shlyakhom zminy rozmiriv ta roztašuvannya por / A.O. Cheylytko // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberzhennya. – 2016. – № 2– P. 82–89.
6. Mestnikov A. Thermal highly porous insulation materials made of mineral raw materials / A. Mestnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2014. DOI:10.1088/1757-899X/71/1/012014.

7. Volfkovich Y. Structural properties of porous materials and powders used in different fields of science and technology / Y. Volfkovich, Filippov A., Bagotsky V. // Springer-Verlag London, 2014. DOI 10.1007/978-1-4471-6377-0.

УДК 62-405.8

Чейлытко А.А., Чейлытко А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОР НА ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрено влияние формы пор на теплопроводность пористого теплоизоляционного материала. Для исследования использовано метод компьютерного моделирования. В качестве формы пор было использовано эллипс. В течении эксперимента угол наклона пор изменялся по отношению к тепловому потоку от 0° до 90° , с шагом в 10° . В ходе исследований было обнаружено, что при размере пор 7 мм, изменение теплового сопротивления от формы пор не значительно и не превышает 1,38 %. Следовательно, улучшение пористых теплоизоляционных материалов не возможно путем варьирования формой пор, при условии небольших размеров этих пор.

Cheilytko Andrii, Cheilytko Anastasiia

FEASIBILITY STUDY OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF METALS CHANGE BY CHANGING THE SIZE AND LOCATION OF PORES

The influence of pores form on the thermal conductivity of porous insulation material was learned. For research was used computer modeling method. The ellipse was used as a form of pores. During the experiment angle have been changing in relation to the heat flow from 0° to 90° , with step of 10° . It was found that with a pore size of 7 mm, the thermal resistance is changing from the pores form less than 1.38 %. Therefore, improvement of heat insulating porous material is not possible by varying the form of pores, in materials with small pore size.

УДК 658.28:665.63:338.44

Быканов С.Н., Горбунов К.А., Горбунова О.В., Ким А.Е.

ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ ЕДКОГО НАТРА

Как известно, выпарные установки являются крупными потребителями тепла. В связи с этим, снижение потребления энергии в процессе выпаривания является актуальной задачей, которая может быть решена несколькими способами [1]. Классический способ – объединение нескольких выпарных аппаратов (ВА) в многокорпусную выпарную установку (МВУ), в которой вторичный пар предыдущего корпуса используется в качестве греющего в последующем. Другой способ – интенсификация тепло- и массообмена в самих ВА с применением различных поверхностей, отвод конденсата по участкам, организация капельной конденсации, повышение скорости пара. Иногда для снижения энергопотребления в схеме выпарной установки применяют термокомпрессор (тепловой насос) [1–3].

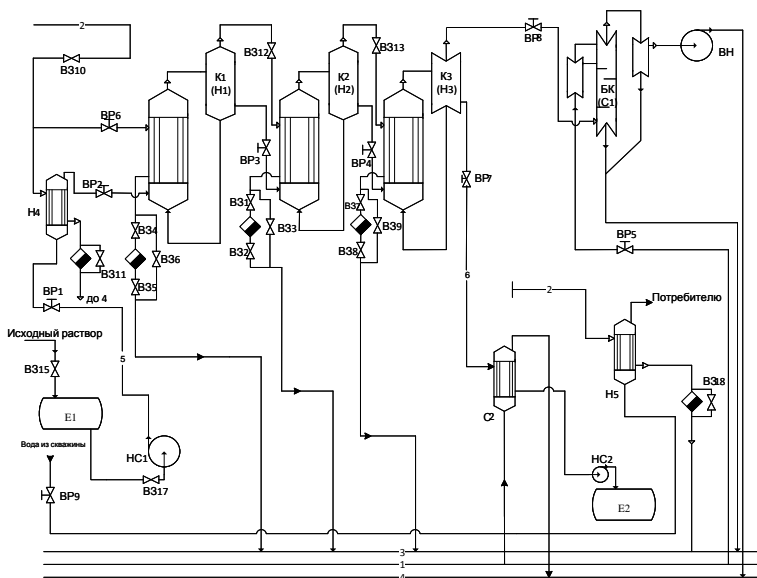
Для снижения энергозатрат в процессе выпаривания также используют метод рекуперации тепла. При этом происходит утилизация вторичных энергоресурсов: потоков конденсата греющего и вторичного паров, раствора различных параметров, которые целесообразно использовать для повышения эффективности использования тепла в выпарной установке. Наиболее полная утилизация тепла в этом случае может быть использована при использовании метода пинч-анализа, который позволяет добиться максимальной рекуперации тепла и максимального снижения потребления греющего пара и охлаждающей воды: т.е. холодных и горячих утилит [4].

Опыт проведения такого рода исследований уже был представлен авторами в предыдущих трудах [5–7]. В данной работе была рассмотрена технологическая схема трехкорпусной выпарной установки для выпаривания едкого натра (NaOH) производительностью 7000 кг/час. Начальная концентрация раствора 15 % (масс), конечная 44 % (масс). Давление греющего пара в первом корпусе 10 атм, в барометрическом конденсаторе 0,2 атм. Схема выпарки протivotочная, циркуляция естественная.

Принципиальная технологическая схема процесса выпаривания едкого натра с тремя корпусами выпарных аппаратов приведена на рис. 1. В схеме использовались выпарные аппараты с естественной циркуляцией раствора и вынесенной греющей камерой.

Исходный раствор NaOH из емкости E1 насосом HC1 направляется в подогреватель H4, где подогревается до температуры кипения, и направляется на выпаривание в первый корпус МВУ. Первый корпус K1 (H1) обогревается свежим греющим паром. В первом корпусе раствор NaOH кипит и упаривается с образованием вторичного пара. Вторичный пар, образующийся при упаривании раствора, направляется в качестве греющего во второй корпус K2 (H2). Сюда же поступает частично сконцентрированный раствор из первого корпуса. Аналогично, упаренный раствор из второго корпуса подается в третий корпус K3 (H3), обогреваемый вторичным паром второго корпуса. Упаренный раствор NaOH (готовый продукт) из третьего корпуса охлаждается в холодильнике C2 и поступает в емкость E2. По мере прохождения из корпуса в корпус давление и температура пара понижаются, и из последнего (третьего) корпуса пар выходит с

низкими параметрами, поэтому его направляют в барометрический конденсатор БК (С1), в котором при конденсации пара образуется вакуум. Раствор и вторичный пар перемещается из корпуса в корпус самотеком благодаря общему перепаду давлений, возникающему в результате избыточного давления в первом корпусе и вакуума в барометрическом конденсаторе. Воздух и неконденсируемые газы, поступающие в установку с паром и охлаждающей водой (в конденсаторе), а также через неплотности трубопроводов, отсасываются через ловушку вакуум-насосом ВН.



Условные обозначения	Название среды в трубопроводе
1	Вода
2	Пар
3	Конденсат
4	В канализацию
5	Исходный раствор
6	Упаренный раствор

Обозначения	Названия	Кол-во
K1-3	Аппарат выпарной	3
БК(С1)	Барометрический конденсатор	1
ВН	Вакуум насос	1
НС1-2	Насос	2
Е1-2	Емкость	2
ВР1-9	Вентиль регулировочный	9
В31-18	Вентиль запорный	17
С2	Холодильник	1
Н4,Н5	Подогреватели	2

Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема процесса выпаривания NaOH (до реконструкции)

Как видно, рекуперация тепла при проведении выпаривания по такой принципиальной схеме происходит, но не в полной степени. Рекуперация тепла осуществляется за счет использования теплоты вторичного пара для обогрева последующих корпусов установки. Теплота конденсатов, упаренного раствора и вторичного пара из третьего корпуса не используется. Расчеты показывают, что при выпаривании раствора NaOH в трехкорпусной выпарной установке по такой принципиальной технологической схеме выпаривания, общий расход греющего пара на проведение процесса составит 0,96 кг/с, (при абсолютном давлении пара $P_{zn} = 10$ атм.). Сюда входит расход греющего пара на проведение выпаривания в трехкорпусной установке, расход пара на подогрев исходного раствора до температуры кипения, расход пара на подогрев воды на технические нужды. Расход охлаждающей воды составит 21,68 кг/с при разности температур 20 °С. Общие затраты горячих утилит составляют: горячего $Q_H=1869,16$ кВт (подвод тепла), холодных утилит $Q_C=1816,71$ кВт (отвод тепла). Количество тепла, которое необходимо затратить на подогрев исходной смеси по такой схеме, составит 941,74 кВт. Количество рекуперированного тепла, за счет обогрева последующих корпусов теплом вторич-

ного пара, составит 1769,75 кВт. Расчеты были проведены на основе материального и теплового баланса многокорпусной выпарной установки.

С целью снижения энергозатрат был рассмотрен вариант модернизации технологической схемы процесса выпаривания с тепловой интеграцией основных технологических потоков на основе метода пинч-анализа. Для этого были рассчитаны расходы, теплоемкости и тепловые нагрузки основных технологических потоков, необходимые для анализа. В качестве основных потоков были выбраны:

горячие потоки: конденсаты 1,2 и 3 корпусов; вторичный пар из 1, 2 и 3 корпуса; упаренный раствор NaOH;

холодные потоки: исходный раствор NaOH; раствор NaOH в 1, 2 и 3 корпусах; вода на технические нужды.

В качестве основных характеристик учитывались: расход G (кг/с); начальная и конечная температура T_H, T_K ($^{\circ}\text{C}$); теплоемкость c (кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$) В соответствии с зависимостью

$$\Delta H = G \cdot c \cdot (T_H - T_K) = CP \cdot (T_H - T_K)$$

были рассчитаны потоковые теплоемкости потоков CP (кВт/ $^{\circ}\text{C}$) и тепловые нагрузки потоков ΔH (кВт), результаты которых приведены в таблице 1.

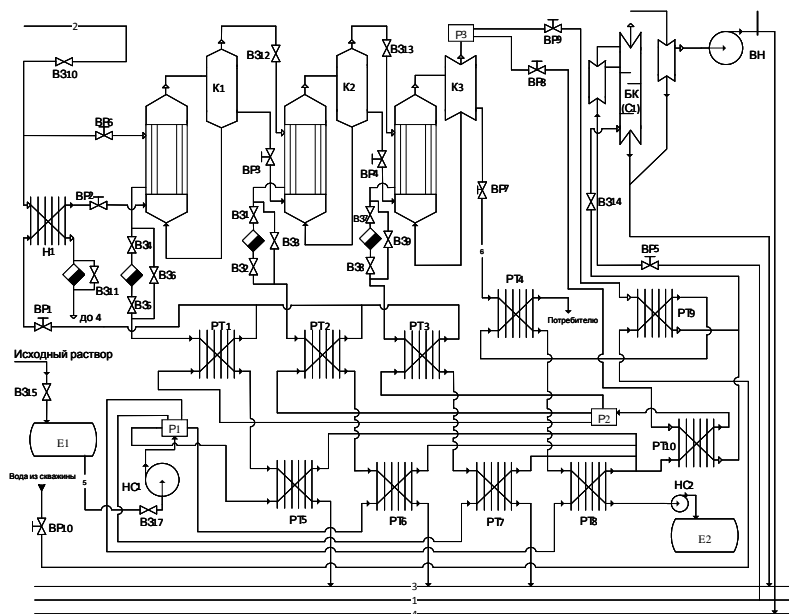
Таблица 1

№	Наименование потока	G , кг/с	T_H , $^{\circ}\text{C}$	T_K , $^{\circ}\text{C}$	c , кДж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$)	CP , кВт/ $^{\circ}\text{C}$	ΔH , кВт
1	Конд. с 1 корп.	0,404	172	30	4,216	1,703	241,83
2	Конд. с 2 корп.	0,381	142	30	4,2	1,6	179,2
3	Конд. с 3 корп.	0,432	105	30	4,189	1,81	135,75
4	Вт.п. с 1 корп. (г)	0,381	149,7	149,7	–	–	807,85
5	Вт.п. с 2 корп. (г)	0,432	112,8	112,8	–	–	961,94
6 а	Вт.п. с 3 корп. (г)	0,469	50	50	–	–	1155,52
6 б	Вт.п. с 3 корп. (г)	0,469	50	47	4,19	1,965	5,9
7	Упар. р-р NaOH	0,662	81	30	2,930	1,94	98,94
8	Исх. смесь (х)	1,944	20	156	3,562	6,925	941,8
9	Р-р NaOH 1 кор.	1,944	157	157	–	–	817,92
10	Р-р NaOH 2 кор.	1,563	125	125	–	–	807,83
11	Р-р NaOH 3 кор.	1,131	82	82	–	–	961,92
12	Вода на тех. н.	0,522	20	70	4,19	2,187	109,35

По данным табл. 1 были построены составные кривые горячих и холодных потоков. С учетом оптимального соотношения энергетических и капитальных затрат было принято $\Delta T_{min} = 8^{\circ}\text{C}$.

Используя метод табличного алгоритма, было получено значение рекуперации $Q_{рек} = 2485,2$ кВт тепла. На основе сеточной диаграммы была спроектирована технологическая схема процесса выпаривания после реконструкции с тепловой интеграцией основных технологических потоков.

Из схемы видно, что поток исходного раствора NaOH после емкости E1 разбивается на несколько потоков в распределителях (делителях) P1 и P2. Это необходимо для обеспечения рекуперации тепла горячих потоков: конденсатов корпусов, упаренного раствора, вторичного пара. Действительно, тепло конденсатов 1,2, и 3 корпусов используется для подогрева исходной смеси NaOH. Это происходит в рекуперативных теплообменниках РТ1-3, РТ5-7. Тепло упаренного раствора NaOH также используется для подогрева исходной смеси и для подогрева воды на технические нужды. Это происходит: в рекуперативном теплообменнике РТ4 – подогревается вода на техн. нужды (вода из скважины), в РТ8 – подогревается исх. смесь. Тепло вторичного пара 1 и 2 корпусов идет на обогрев 2 и 3 корпусов установки (как и раньше), а тепло вторичного пара 3 корпуса частично используется для подогрева исходного раствора (РТ-10) и воды на технические нужды (РТ9). За счет этого количество горячих утилит, т.е. тепла, необходимого для подогрева исходного раствора и воды на тех. нужды, снизилось на 714 кВт и составило $Q_{H min} = 1155,2$ кВт. Количество холодных утилит, т.е. тепла, которое необходимо отнимать для охлаждения конденсатов и упаренного раствора, снизилось на 715 кВт и составило $Q_{C min} = 1101,9$ кВт.



Условные обозначения	Название среды в трубопроводе
1	Вода
2	Пар
3	Конденсат
4	В канализацию
5	Исходный раствор
6	Упаренный раствор

Обозначения	Названия	Кол-во
K1-3	Аппарат выпаривающей	3
БК(С1)	Барометрический конденсатор	1
ВН	Вакуум насос	1
Н1	Подогреватель	1
РТ1-10	Рекуп. ТА	10
НС1-2	Насос	2
P1-2-3	Разделитель	3
E1-2	Емкость	2
BP1-9	Вентиль регулировочный	9
B31-18	Вентиль запорный	17

Рисунок 2 – Технологическая схема процесса выпаривания NaOH после реконструкции

Выводы. Таким образом, в работе была проведена реконструкция технологической схемы процесса выпаривания NaOH с применением метода пинч-анализа, целью

которой является снижение энергозатрат. В результате удалось снизить количество горячих утилит с 1869,2 кВт до 1155,2 кВт. Расход греющего пара снизился с 0,96 до 0,57 кг/с. Это на 38,2 % меньше, чем до реконструкции. Количество холодных утилит удалось снизить с 1816,7 кВт до 1101,7 кВт. Расход охлаждающей воды уменьшился с 21,68 до 13,15 кг/с. Это на 39,3 % меньше по сравнению с принципиальной технологической схемой процесса выпаривания (рис. 1). Естественно, подобная схема (рис. 2) требует установки новых теплообменных аппаратов, установки соответствующих средств автоматизации, что приведет к увеличению капитальных затрат. Однако увеличение капитальных затрат в данном случае оправдано, так как в результате капиталовложений снизится энергоемкость производства в целом.

Срок окупаемости модернизированной технологической схемы процесса выпаривания раствора NaOH по сравнению с осуществлением этого процесса по принципиальной технологической схеме МВУ составит около 3-х лет.

Литература

1. Выпаривание. Е.И. Таубман. М.: Химия, 1982.– 328 с.
2. Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні. Навчальний посібник / В.Р. Кулінченко, В.Г. Мирончук. К.: Кондор, 2006.– 392 с.
3. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ГОТЛИНСЬКА А.П. та ін. Процеси та апарати хімічної технології. Підручник. У двох книгах. Книга 1 / Під заг. ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 616 с.
4. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, П. А. Капустенко, Л.М. Ульев. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 457 с.
5. Хіміч О.І., Перевертайленко О.Ю., Горбунов К.О., Рябова І.Б. Теплова інтеграція процесу концентрування суміші у виробництві броміду натрію // Наукові праці.– Випуск 45, Т.3.– Одеса: Одеська національна академія харчових технологій.– 2014.– С. 176–179.
6. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., Перевертайленко О.Ю., Гарев А.О., Горбунов К.О., Биканов С.М., Толста Н.О. Покращення теплової інтеграції процесу концентрування квасного суслу Наукові праці.– Випуск 39 Т.2.– Одеса: Одеська національна академія харчових технологій.– 2011.– С. 146–151.
7. Болдирев С.О., Крикун О.І., Толста Н.О. Застосування засобів комп'ютерної інтеграції та автоматизація процесу концентрування розчину нітрату натрію // Тези доповідей на науковій конференції «Мікрокад-2010» Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. III (12–14 травня 2010 р., Харків). С. 7.

Bibliography (transliterated)

1. Vyiparivanie. E.I. Taubman. M.: Himiya, 1982.– 328 p.
2. Vyparyuvannya i viparni aparati u rozrahunkah i konstruyuvanni. Navchalnyi posibnik / V.R. Kulinchenko, V.G. Mironchuk. K.: Kondor, 2006.– 392 p.

3. Tovazhnyanskyy L.L., Gotlinska A.P. ta in. protsesi ta aparati himichnoyi tehnologiyi. Pidruchnik. u dvoh knigah. kniga 1 / Pid zag. red. L.L. Tovazhnyanskogo L.. – Harkiv: NTU «HPI», 2007. – 616 p.

4. Smit R. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov / R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnyanskyy, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev. – Harkov: HGPU, 2000. – 457 p.

5. Himich O.I., Perevertaylenko O.Yu., Gorbunov K.O., Ryabova I.B. Teplova integratsiya protsesu kontsentruvannya sumishi u virobnitstvi bromidu natriyu // Naukovi pratsi.– Vipusk 45, T.3.– Odesa: Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy.– 2014.– P. 176–179.

6. Tovazhnyanskyy L.L., Perevertaylenko O.Yu., Garev A.O., Gorbunov K.O., Bikanov S.M., Tolsta N.O. Pokraschennya teplovoyi Integratsiyi protsesu kontsentruvannya kvasnogo susla Naukovi pratsi.– Vipusk 39 T.2.– Odesa: Odeska natsionalna akademiya harchovih tehnologiy.– 2011.– P. 146–151.

7. Boldirev S.O., Krikun O.I., Tolsta N.O. Zastosuvannya zasobiv komp'yuternoyi integratsiyi ta avtomatizatsiya protsesu kontsentruvannya rozchinu nitratu natriyu // Tezi dopovidey na naukoviy konferentsiyi «Mikrokad-2010» Informatsiyntehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita zdorov'ya: Tezi dopovidey XVIII mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi, Ch. III (12–14 travnya 2010 r., Harkiv). P. 7.

УДК 658.28:665.63:338.44

Биканов С.М., Горбунов К.О., Горбунова О.В., Кім А.Є.

ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ ІДКОГО НАТРУ

Проведена реконструкція технологічної схеми процесу випарювання NaOH з застосуванням методу пінч-аналізу, метою якої є зниження енерговитрат. До основного результату можна віднести зниження гарячих утиліт до 1155,2 кВт, а холодних до 1101,7 кВт.

Bykanov S., Gorbunov K., Gorbunova O., Kym A.

THERMAL INTEGRATION OF SODIUM HYDROXIDE EVAPORATION

Technological scheme reconstruction for NaOH evaporation process using the pinch analysis method was made. The aim of reconstruction was to reduce energy consumption. The main results is decreasing of hot utilities to 1155,2 kW and cool to 1101,7 kW.

УДК 661.333(075)–048.34:510.522

Бобух А.О., Дзевочко О.М., Подустов М.О. Переверзева А.М.

АЛГОРИТМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ АБСОРБЦІЇ-ДЕСОРБЦІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ У РЕАЛЬНОМУ ІНТЕРВАЛІ ЧАСУ

Вступ

Хіміко-технологічні процеси виробництва кальцированої соди за аміачним способом (ВКС) відносяться до класу об'єктів, у яких технологічні процеси переробки сировини, яка знаходиться у неперервному контакті з апаратами різного технологічного призначення, змінюють свої хімічні склади [1]. До складу ВКС входять основні та допоміжні об'єкти [2], серед яких дуже важливе місце належить технологічним процесам об'єкту абсорбції-десорбції (ОАБ-ДС), оскільки на отримання 1 т кальцированої соди на них приходиться більше 60 % усіх витрат на ВКС [1]. З урахуванням виконаних досліджень [2–4] була формалізована задача оптимізації цього об'єкту, яку доцільно розглядати як розв'язання двох задач керування на великих (8 годин – тривалість робочої зміни неперервних виробництв) та малих (реальний масштаб – в межах великого) інтервалах часу. При цьому на великому інтервалі часу треба розв'язувати задачу оптимізації, а на малому – задачу стабілізації якісних показників роботи цих процесів відносно визначених на початку робочої зміни їх оптимальних значень.

Мета роботи

Розробити алгоритм стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів об'єкту абсорбції-десорбції виробництва кальцированої соди за аміачним способом у реальному інтервалі часу відносно визначених на початку кожної робочої зміни їх оптимальних значень.

Основна частина

Розглянемо формальну постановку задачі розробки алгоритму стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів типового чотириелементного ($i = \overline{1,4}$) ОАБ-ДС ВКС, при цьому треба передбачити, що необхідні математичні моделі попередньо отримані [3, 5]. Для розуміння подальших викладок введемо деякі пояснення:

1) математична модель кожного із чотирьох елементів ($i = \overline{1,4}$) ОАБ-ДС ВКС може бути описана наступними параметрами:

керуючі (вхідні, незалежні) параметри, їх – 5 ($j = \overline{1,5}$):

X_{1i} – витрати фільтрової рідини (ведучий потік) на i – й елемент, м³/год.;

X_{2i} – витрати пари на i – елемент, т/год.;

X_{3i} – витрати очищеного розсолу на i – й елемент, м³/год.;

X_{4i} – витрати вапняної суспензії на i – й елемент, м³/год.;

X_{5i} – сумарні витрати холодної води на i – й елемент, м³/год.;

керовані (вихідні, залежні) параметри, їх також – 5 ($s = \overline{1,5}$):

Y_{1i} – поточне значення концентрації аміаку в амонізованому розсолі після i – го елемента ОАБ-ДС, Кмоль/м³;

Y_{2i} – поточне значення концентрації хлору в амонізованому розсолі після i – го

елементу ОАБ-ДС, Кмоль/м³;

Y_{3i} – поточне значення температури суміші аміаку, вуглекислого газу та пари i -го елемента ОАБ-ДС, °С;

Y_{4i} – концентрація аміаку в суспензії дистиляції i -го елемента ОАБ-ДС, Кмоль/м³;

Y_{5i} – концентрація хлору в суспензії дистиляції i -го елемента ОАБ-ДС, Кмоль/м³;

2) згідно технології ВКС [1] наведені вище параметри мають граничні значення вимірювання:

$$\begin{aligned} X_{ji}^{\min} \leq X_{ji}(t) \leq X_{ji}^{\max}, (j = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}), \\ Y_{si}^{\min} \leq Y_{si}(t) \leq Y_{si}^{\max}, (s = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}). \end{aligned} \quad (1)$$

$$R - \varepsilon \leq \sum_{i=1}^4 X_{li}(t) \leq R + \varepsilon, \quad (2)$$

$$G_1 \leq \frac{Y_{li}(t)}{Y_{2i}(t)} \leq G_2, \text{ або } G_1 Y_{2i}(t) \leq Y_{li}(t) \leq G_2 Y_{2i}(t), \quad (3)$$

де R – сумарні витрати на чотири елементи ОАБ-ДС за ведучим потоком (фільтровій рідині $\sum_{i=1}^4 X_{li}; i = \overline{1,4}; \text{ м}^3/\text{год.}$), що залежать від плану випуску кальцинованої соди;

ε – мале число, що залежить від концентрації аміаку в фільтровій рідині; $G_1 = 1,12; G_2 = 1,17$ – обмеження, які характеризують ступінь абсорбції аміаку очищеними розсолом;

3) із керованих технологічних параметрів Y_{si} ($s = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}$) тільки чотири відносяться до якісних показників технологічних процесів ОАБ-ДС Y_{si} ($s = 1, 2, 4, 5; i = \overline{1,4}$), але вони автоматично не контролювані, а тому для визначення цих параметрів використовуємо їх лінійну залежність [2] від керуючих параметрів X_{ji} ($j = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}$) у вигляді:

$$Y_{si}(t) = \sum_{j=1}^5 a_{sji} X_{ji} + a_{soi}, (s = 1, 2, 4, 5; i = \overline{1,4}; j = \overline{1,5}), \quad (4)$$

де a_{sji} – коефіцієнти при X_{ji} , a_{soi} – вільні члени.

Задача стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів ОАБ-ДС ВКС в реальному інтервалі часу потребує розробки алгоритму, який сприяв би отриманню мінімальних відхилень цих показників відносно визначених на початку кожної робочої зміни їх оптимальних значень [1].

При розробці алгоритму стабілізації якісних показників у реальному інтервалі часу будемо прагнути до мінімуму критерію I ($\min I$), при цьому ведучий потік, сума-
 X_{ji}
рні витрати фільтрової рідині (R) на чотири елементи ОАБ-ДС, залишається незмінним:

$$\min_{X_{ji}} I = \min_{X_{ji}} \sum_{s=1}^5 \sum_{i=1}^4 (Y_{si}(t) - Y_{si}(0))^2; \quad j = \overline{1,5}; \quad s = 1, 2, 4, 5, \quad (5)$$

де $y_{si}(0)$ – визначені на початку великого (кожної робочої зміни) інтервалу часу оптимальні значення $y_{si}(t)$.

Оскільки обчислення за алгоритмом (5) складні, запровадимо деякі спрощення для виключення необхідності виконувати умови (2). Тому алгоритм стабілізації запишемо у вигляді:

$$\min_{X_{ji}} I = \min_{X_{ji, j \neq 1}} \sum_{s=1}^5 (Y_{si}(t) - Y_{si}(0))^2, \quad i = \overline{1,4}; \quad j = \overline{2,5}, \quad (6)$$

при цьому припускається, що всередині великого інтервалу часу:

$$\min_{X_{ji}} I = \sum_{i=1}^4 \min_{X_{ji, j \neq 1}} I_i. \quad (7)$$

Таким чином, алгоритм (5) за рахунок декомпозиції за формулою (6) розпадається на чотири алгоритми пониженої розмірності.

З урахуванням лінійності визначених значень $y_{si}(t)$ (4) за керуючими параметрами X_{ji} ($j = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}$), а також те, що стабілізація (6) зводиться до визначення чотирьох керованих параметрів X_{ji} (i – фіксовано для конкретного елемента, а $j = \overline{2,5}$), для пошуку мінімального відхилення чотирьох якісних показників $Y_{si}(t)$ ($s = 1, 2, 4, 5$) від оптимальних значень $y_{si}(0)$, необхідно розглянути задачу, яка може бути обрхована методом найменших квадратів [6–7], тобто:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y, \quad (8)$$

де

$$X = \begin{pmatrix} X_{2i} \\ X_{3i} \\ X_{4i} \\ X_{5i} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_{12i} & a_{13i} & a_{14i} & a_{15i} \\ a_{22i} & a_{23i} & a_{24i} & a_{25i} \\ a_{42i} & a_{43i} & a_{44i} & a_{45i} \\ a_{52i} & a_{53i} & a_{54i} & a_{55i} \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} Y_{1i}(0) - a_{10i} - a_{11i} X_{1i} \\ Y_{2i}(0) - a_{20i} - a_{21i} X_{1i} \\ Y_{4i}(0) - a_{40i} - a_{41i} X_{1i} \\ Y_{5i}(0) - a_{50i} - a_{51i} X_{1i} \end{pmatrix} \dots$$

Для того, щоб уникнути перетворення матриці A , використаємо рекурентний метод найменших квадратів [8], початкове наближення до якого визначається на початку великого інтервалу часу. У цьому випадку отримуємо:

$$X_{ji}^{n+1} = X_{ji}^n + P^{n+1} (Y_{si}^{n+1}(0) - Y_{si}(n+1)), \quad (9)$$

$$P^{n+1} = \frac{A^n a^{n+1}}{1 + (a^{n+1})^T A^n a^{n+1}}, \quad (10)$$

$$A^{n+1} = A^n - \frac{(A^n a^{n+1})(A^n a^{n+1})^T}{1 + (a^{n+1})^T A^n a^{n+1}}, \quad (11)$$

де n – дискретний час; A^n – ця матриця співпадає за структурою із матрицею A із формули (8) в неоднакові інтервали часу;

$$\text{вектор } a^{n+1} = \begin{pmatrix} a_{s2i} \\ a_{s3i} \\ a_{s4i} \\ a_{s5i} \end{pmatrix};$$

$Y_{si}^{n+1}(0)$ – оптимальне значення одного із елементів за номером $s = 1, 2, 4, 5$ вектора Y із формули (8).

Треба занотувати, що в кожен момент часу $n+1$ необхідно виконати s ітерацій відповідно до формул (9)–(11) для отримання значень X_{ji}^{n+1} , які визначаються, оскільки у цей саме час збільшується інформація у вигляді чотирьох нових значень вектора a^{n+1} .

З урахуванням формул (4)–(11) та через те, що число керуючих впливів X_{ji} ($j=1,5; i=1,4$) більше числа якісних параметрів $Y_{si}(t)$ ($s=1,2,4,5$) технологічних процесів ОАБ-ДС ВКС, які стабілізуються, запропонована достовірна процедура отримання значень якісних параметрів $Y_{si}(t)$ ($s=1,2,4,5$) відповідно до їх оптимальних значень $Y_{si}(0)$ $s = 1, 2, 4, 5$.

Практичне використання розробленого алгоритму стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів ОАБ-ДС ВКС у реальному інтервалі часу відносно визначених на початку кожної робочої зміни їх оптимальних значень може бути реалізоване при розробці комп'ютерно-інтегрованого керування цим виробництвом із застосуванням сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерів.

Висновок. В результаті досліджень розроблений алгоритм стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів абсорбції-десорбції виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) у реальному інтервалі часу відносно визначених на початку кожної робочої зміни їх оптимальних значень.

Показано, що розробка алгоритму стабілізації якісних показників роботи цих процесів розпадається на чотири задачі стабілізації якісних показників роботи кожного із чотирьох елементів пониженої розмірності, які вирішуються із застосуванням методу найменших квадратів та рекурентного методу найменших квадратів.

Практичне використання розробленого алгоритму може бути реалізоване при розробці комп'ютерно-інтегрованого керування цим виробництвом із застосуванням сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерів.

Впровадження розробленого алгоритму буде сприяти підвищенню ефективності функціонування та зниженню енергетичних витрат ВКС.

Література

1. Зайцев И.Д. Производство соды [Текст] / И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев. – М.: Химия. 1984. – 312 с.

2. Бобух А.А. Выбор и оптимизация критерия управления объектом абсорбции-десорбции производства кальцинированной соды [Текст] / А.А. Бобух, А.М. Дзевочко, М.А. Подустов, А.Н. Переверзева, Р.С. Романенко // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». 2015. № 4. – С. 72–81.

3. Бобух А.О. Алгоритм структурної ідентифікації об'єктів виробництва кальцинованої соди [Текст] / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, А.С. Сляднева // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». 2016. № 1. – С. 13–18.

4. Бобух А.О. Алгоритм оптимізації чистого доходу об'єкта абсорбції-десорбції виробництва кальцинованої соди [Текст] / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, М.І. Черножуков // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». – 2016. № 2. – С. 25–31.

5. Бобух А.А. Двухшаговый адаптивный алгоритм идентификации нестационарных объектов [Текст] / А.А. Бобух, А.М. Дзевочко, М.А. Подустов, А.С. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». 2015. № 30 (1139). – С. 11–17.

6. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 680 с.

7. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. – М. : Наука, 1995. – 336 с.

8. Дорф Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп, пер. с англ.: Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

Bibliography (transliterated)

1. Zaytsev I.D. Proizvodstvo sodyi [Tekst] / I.D. Zaytsev, G.A. Tkach, N.D. Stoev.- М.: Himiya. 1984.– 312 p.

2. Bobuh A.A. Vyibor i optimizatsiya kriteriya upravleniya ob'ektom absorbtzii-desorbtsii proizvodstva kaltsinirovannoy sodyi [Tekst] / A.A. Bobuh, A.M. Dzevochko, M.A. Podustov, A.N. Pereverzeva, R.S. Romanenko // Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal «Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya». Vidavnichiy tsentr NTU «HPI». 2015. # 4.– P. 72–81.

3. Bobuh A.O. Algoritm strukturoyi identifikatsiyi ob'ektiv virobnitstva kaltsinovanoyi sodi [Tekst] / A.O. Bobuh, O.M. Dzevochko, M.O. Podustov, A.S. Slyadneva // Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal «Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya». Vidavnichiy tsentr NTU «HPI». 2016. # 1.– P. 13–18.

4. Bobuh A.O. Algoritm optimizatsiyi chistogo dohodu ob'ekta absorbttsiyi-desorbtsiyi virobnitstva kaltsinovanoyi sodi [Tekst] / A.O. Bobuh, O.M. Dzevochko, M.O. Podustov, M.I. Chernozhukov // Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal «Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya». Vidavnichiy tsentr NTU «HPI»– 2016. # 2.– P. 25–31.

5. Bobuh A.A. Dvuhshagoviy adaptivniy algoritm identifikatsii nestatsionarnyih ob'ektov [Tekst] / A.A. Bobuh, A.M. Dzevochko, M.A. Podustov, A.S. Kravchenko // Visnik NTU «HPI». – Seriya: Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya. – H.: NTU «HPI». 2015. # 30 (1139). – P. 11–17.

6. Eykhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniya [Tekst] / P. Eykhoff. – М. : Mir, 1975. – 680 p.

7. Tsyipkin Ya.Z. Informatsionnaya teoriya identifikatsii [Tekst] / Ya.Z. Tsyipkin. – М. : Nauka, 1995. – 336 p.

8. Dorf R. Sovremennyye sistemyi upravleniya [Tekst] / R. Dorf, R. Bishop, per. s angl.: B.I. Kopyilova. – М.: Laboratoriya Bazoviyh Znaniy, 2004. – 832 p.

УДК 661.333(075)–048.34:510.522

Бобух А.А., Дзевочко А.М., Подустов М.А., Переверзева А.Н.

АЛГОРИТМ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АБСОРБЦИИ-ДЕСОРБЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ В РЕАЛЬНОМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ

В результате исследований разработан алгоритм стабилизации качественных показателей работы технологических процессов абсорбции-десорбции производства кальцинированной соды по аммиачному способу (ПКС) в реальном интервале времени относительно определенных в начале каждой рабочей смены их оптимальных значений.

Показано, что разработка алгоритма стабилизации качественных показателей работы этих процессов распадается на четыре задачи стабилизации качественных показателей работы каждого из четырех элементов пониженной размерности, которые решаются с применением метода наименьших квадратов и рекуррентного метода наименьших квадратов.

Практическое применение разработанного алгоритма может быть реализовано при разработке компьютерно-интегрированного управления этим производством с применением современных многофункциональных микропроцессорных контроллеров.

Внедрение разработанного алгоритма будет способствовать повышению эффективности функционирования и снижению энергетических затрат ПКС.

Bobukh A.O., Dzevochko O.M., Podustov M.O., Pereverseva A.M.

THE STABILIZATION ALGORITHM OF QUALITY INDICATORS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ABSORPTION-DESORPTION OF SODA ASH PRODUCTION IN REAL INTERVAL TIME

As a result of research developed the algorithm of stabilization performance of quality of technological processes of absorption-desorption of soda ash production by the ammonia method (SAP) in real time interval is relatively certain at the beginning of each work shift their optimal values.

It is shown that the development of a stabilization algorithm of qualitative performance indicators of these processes falls into four the problem of stabilization of the quality indicators of each of the four elements with reduced dimensions, which solved using the method of least squares and recursive method of least squares.

The practical application of the developed algorithm can be implemented in developing a computer-integrated management of these production with application of modern multifunctional microprocessor-based controllers.

Implementation of the developed algorithm will increase the efficiency of operation and reducing the energy costs of the SAP.

УДК 621.184.004

Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Куликова Н.В., Редько И.А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ

Введение. Основным источником теплоты в топках котлов являются потоки лучистой энергии. Вклад конвективного теплообмена не превышает 3÷4 %. При высоких скоростях топочных газов (50÷70 м/с) его роль увеличивается. В топках газовых котлов структура факела горящего топлива и концентрация трёхатомных продуктов сгорания (CO_2 и H_2O) определяют объёмное излучение газов. Температура газовой среды существенно влияет на теплообмен в топке, так при снижении температуры в топке на 10 % тепловосприятие теплообменных поверхностей уменьшается в 1,5 раза. В топочном объёме наблюдается пространственное несимметричное поле температур излучающей среды. Неравномерность тепловосприятия в подъёмных трубах топки влияет на массовый расход пароводяной смеси. Плотность пароводяной смеси определяется местом подвода теплоты по высоте топки. Подвод теплоты в нижней части парогенерирующих труб приводит к снижению плотности пароводяной смеси в подъёмных трубах и вызывает рост скорости смеси в контуре и повышению эффективности теплообмена. При подводе теплоты к верхним участкам труб ухудшаются теплообменные процессы.

Методы расчёта теплообмена в топках котлов приведены в [1–3]. Разработаны различные математические модели расчёта, которые служат основой инженерных методик [10]. В настоящее время для диагностики температурного состояния металла экранных водотрубных поверхностей требуется знание распределения температуры газов в объёме топки, радиационных и суммарных плотностей тепловых потоков, структуры факела. Поэтому актуальным является численное исследование процессов теплообмена в топочных камерах.

Состояние проблемы. Исследование эффективности теплообмена, аэродинамики и методов снижения оксидов азота путём проведения натурных огневых теплотехнических и экологических испытаний затратные и трудоёмкие [4]. При этом топочные устройства котельных установок характеризуются разнообразием аэродинамических схем (встречная компоновка вихревых и прямоочных горелок, тангенциальная компоновка, циклонные и кольцевые топки, топки с плоскофакельными горелками и др.), геометрией и объёмом топок, что затрудняет экспериментальное моделирование. Разработка численных методов и моделей основывается на теоретических исследованиях физико-химических процессов сжигания топлив [5–7]. Достаточно полные сведения по химической кинетике процессов горения отсутствуют, и поэтому применяются приближенные постановки. В работах [8–17] численными методами исследовались различные типы котлов, как крупных энергетических и промышленных, так и котлов малой мощности. Исследовались топки жаротрубных и водотрубных котлов. Однако, исследование теплообмена, аэродинамики и методов снижения выбросов оксидов азота продолжается, что и определяет актуальность данного исследования. Поэтому в настоящее время при исследовании процессов сжигания топлив широко используются численные методы моделирования и компьютерные технологии.

Тепловая нагрузка топки определяется величиной Q/V [МВт/м³] и при изменении паропроизводительности котла возможно её регулирование в широком диапазоне 1:7. При этом существенно изменяются тепловые, аэродинамические и экологические характеристики котлов.

Цель работы. Численное исследование теплообмена в топке водотрубного котла ДЕ-10/14 при различной паропроизводительности (100, 50 и 15 %).

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225 °С абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч. Котел оснащен одной горелкой ГМ-7 тепловой мощностью 7 Гкал/ч (8,12 МВт).

Процессы теплообмена являются нестационарными, что усложняет экспериментальное исследование и создание строгой теории. При моделировании процессов сжигания используются методы теории турбулентных струй, законы сохранения массы и импульса, физики горения и теплообмена.

Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усредненных за Рейнольдсом уравнений Навье-Стокса с учетом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью. Модель составляют уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Клапейрона–Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности $k-\varepsilon$ Лаундер-Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена–Хертагера [18–23]. На основе чертежей котла и горелки ГМГ-7 построено геометрическую модель внутренней полости топки и горелки (рис. 1).

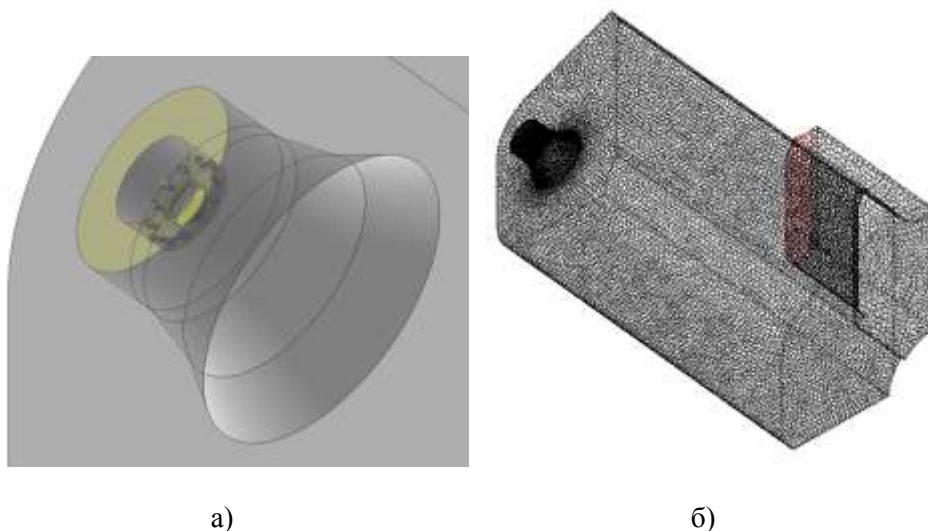


Рисунок 1 – Расчётные модели: а) – модель горелки; б) – расчётная сетка топки котла

Воздух в горелку ГМГ поступает двумя потоками – около 15 % в виде первичного воздуха через регистр с углом лопаток 60° (коэффициент крутки $n_1=2,4$), другая часть в виде вторичного воздуха в объёме около 95 % закручивается в лопаточном аппарате регистра, лопатками, установленными под углом 45°, коэффициент крутки

$n_2=1,6$. Подача газа – центральная (42 отверстия), параллельно воздушному потоку при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,10$. Закрутка первичного и вторичного воздуха – в одну сторону.

Для расчета температурных характеристик топочной камеры производится дискретизация её объёма (расчётной области) в соответствии с методом контрольного объёма. В результате такой дискретизации получается некоторое количество контрольных объёмов (расчётных ячеек) N_V с соответствующим количеством граней N_F , в том числе граничных граней $N_{F,b}$, которые принадлежат границе расчётной области. В центрах расчётных ячеек рассчитываются все интересующие характеристики топочной среды. В центрах граничных граней рассчитываются температура стенки внутри и снаружи топки, а также плотности радиационного и конвективного потока на стенку. В настоящей модели количество ячеек и граней составляет: $N_V = 452\ 533$; $N_F = 2\ 985\ 607$; $N_{F,b}$ – не контролируется. Расчёты выполнялись также согласно нормативному методу теплового расчёта котлов [24].

Основные результаты и их анализ. Трёхмерное представление температурных полей при различных режимах приведено на рис. 2.

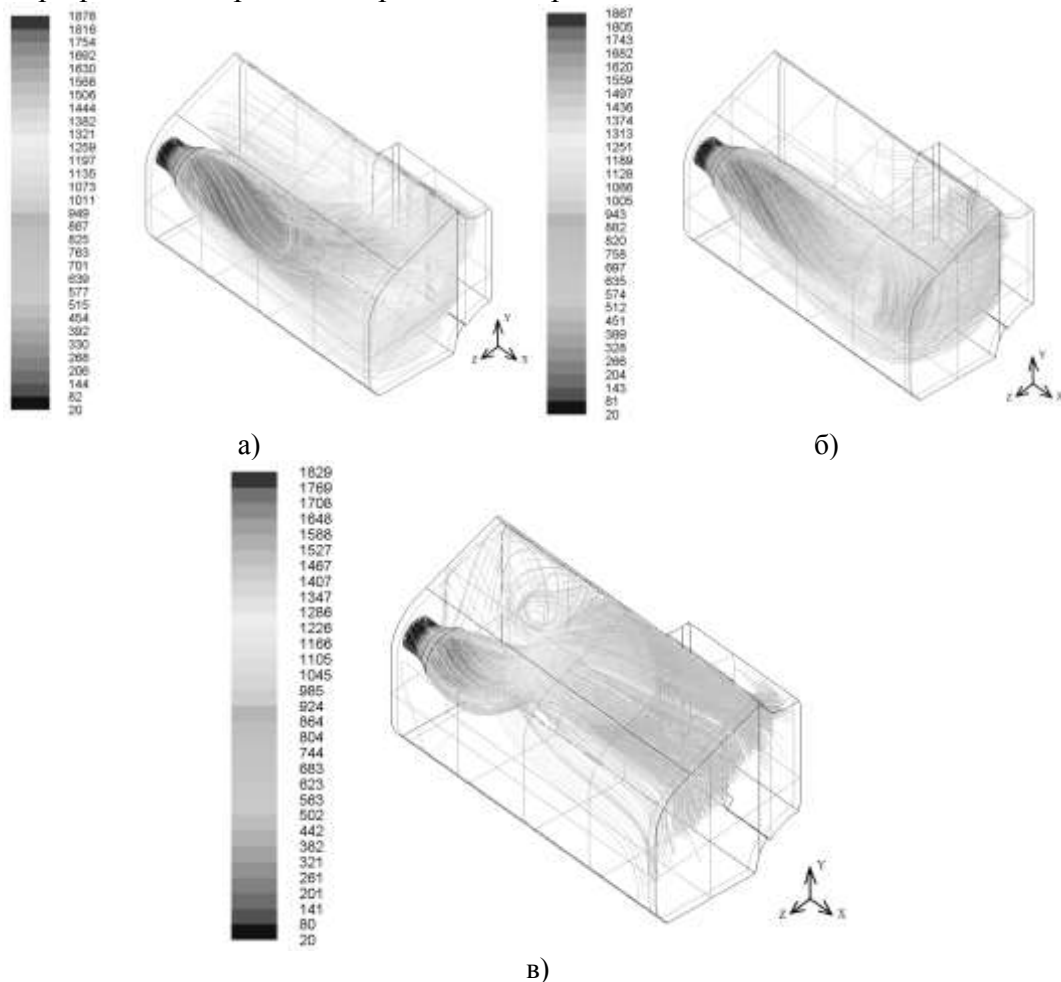


Рисунок 2 – Значения температурных полей при различных режимах: а) 100 % от номинальной нагрузки; б) 50 % от номинальной нагрузки; в) 15 % от номинальной нагрузки

Наблюдается существенное изменение температуры в топочном объёме от

области ядра горения, как по глубине топки, так и к пристеночной области к экранным трубчатым поверхностям.

Результаты расчёта температурного поля, представленные в плоскостях по оси горелки, показывают область максимальных температур по глубине и высоте топки (рис. 3). На рис. 3 представлена структура факела, видимым фронтом горения является участок длиной до 2,5 м и в диаметре 0,8–1 м.

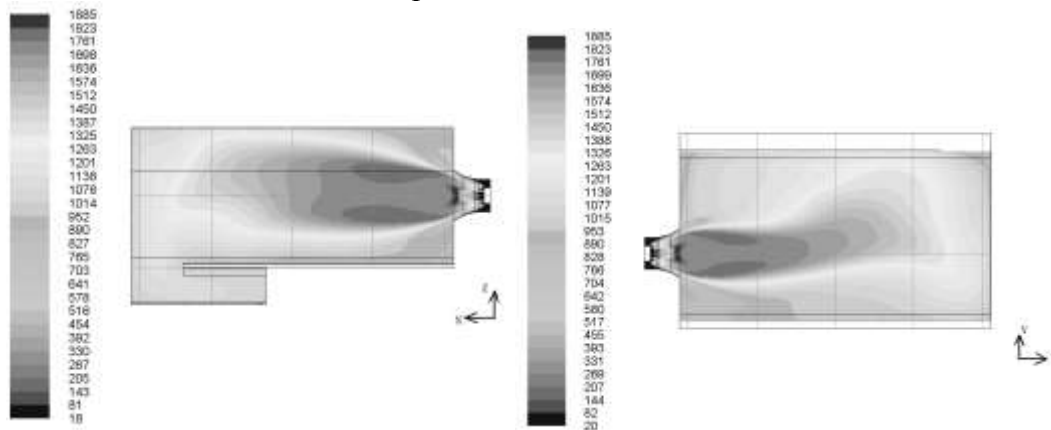


Рисунок 3 – Структура факела: а) – вид сверху; б) – вид сбоку

В этой области происходит сгорание предварительно подготовленной топливно-воздушной смеси при температуре 1500–1700 °С. Температурное поле в поперечных сечениях по глубине топки (на срезе горелки и через 1 м), указывает на значение температуры на оси и вблизи пристеночной области.

На рис. 4 показано изменение средней температуры газов по глубине топки при различных режимах нагрузки котла. Температура газов на выходе из топки изменяется от 1070 до 700 °С.

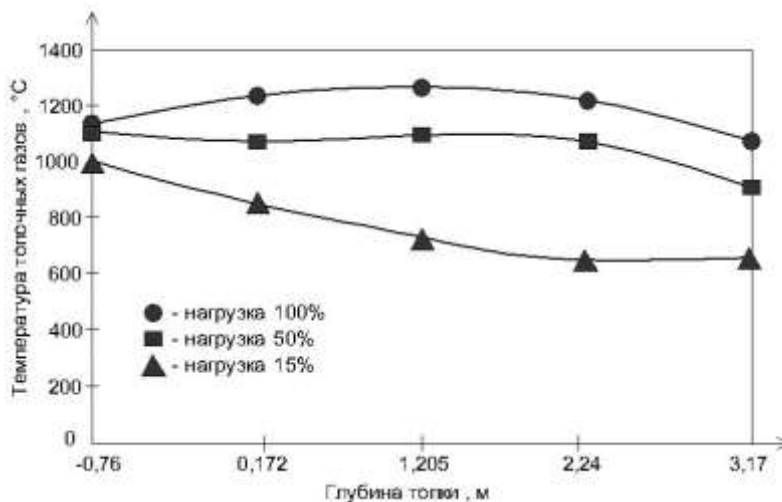


Рисунок 4 – Распределение температуры топочных газов по глубине топки при различных режимах эксплуатации

Значения средней плотности теплового потока показаны на рис. 5 и 6. Максимальные значения плотности теплового потока наблюдается на расстоянии от 1 м до 2,2 м по глубине топки и достигает значений 130–140 кВт/м². При изменении

режимов експлуатації і теплової навантаження щільність теплового потоку змінюється від 140 кВт/м^2 до $20\text{--}25 \text{ кВт/м}^2$, що викликає значительні термічні напруження в металі екранних труб. Установлено, що лучистий теплообмін являється основним механізмом теплопереносу ($67\text{--}70 \%$) від топочних газів до екранним трубчастим поверхностям.

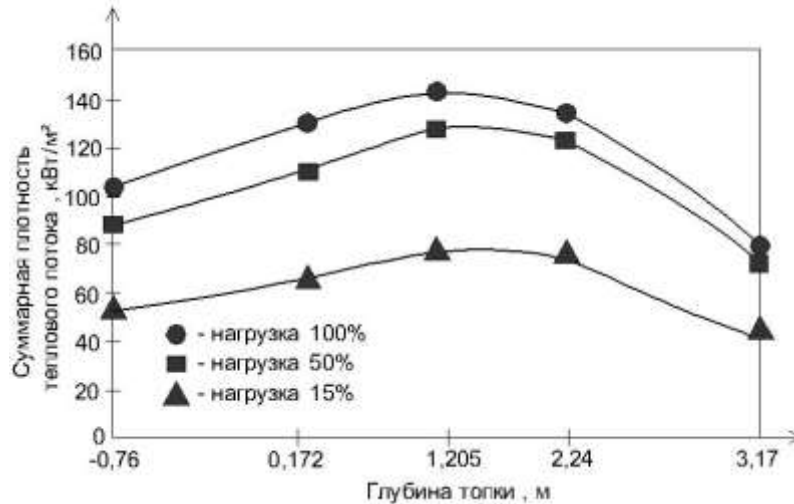


Рисунок 5 – Розподіл сумарної щільності теплового потоку по глибині топки при різних режимах експлуатації

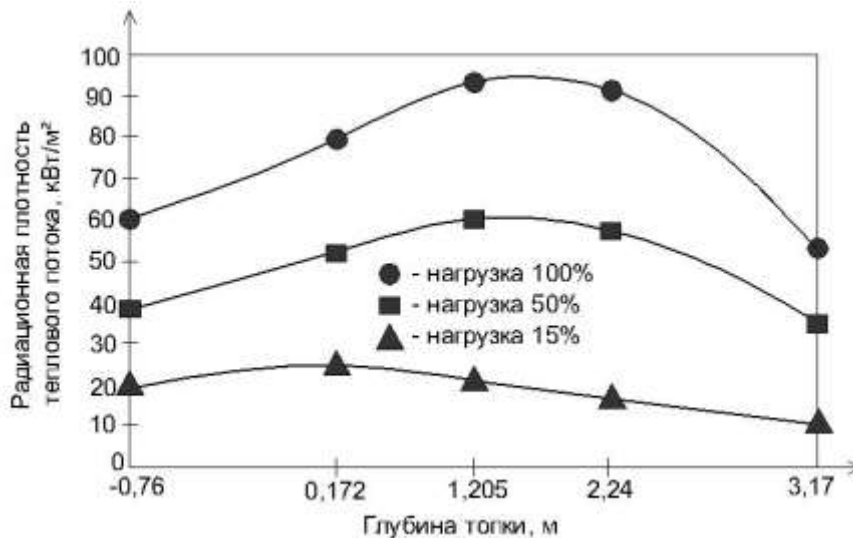


Рисунок 6 – Розподіл радіаційної щільності теплового потоку по глибині топки при різних режимах експлуатації

Висновки. Результати чисельного моделювання процесів теплообміну при сжигании газів в топочному об'ємі котла ДКВР-10/14 (ДЕ-10/14) з горелкою ГМГ-7 показали, що в топці створюється не осесиметричний, неізотермічний факел довжиною від 1,5 м до 2,5 м діаметром около 1 м.

При понижении теплової навантаження і зниженні паропроизводительности факел зменшується в довжину до 0,8–1,0 м і «вспливає», а дожигание происходит вверху топки. Середня щільність теплового потоку змінюється по глибині топки від 100 кВт/м^2

до 80 кВт/м². При изменении тепловой нагрузки плотность теплового потока снижается до 60 кВт/м². Заполнение топочного объёма снижается до 20 %, скорость газов понижается от 45 м/с до 4-6 м/с. Механизм лучистого теплообмена составляет при этом 20%. Таким образом, горелка ГМГ-7 с коэффициентом крутки $n_1=2,4$ и $n_2=1,6$ не обеспечивает эффективное сжигание газа и организацию теплообмена в топочном объёме котла ДЕ-10/14. При этом, выброс оксидов азота на выходе из топки котла увеличивается до значений 191–198 мг/м³.

Литература

1. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с.
2. Михайлов А.Г. Методы расчёта теплообмена в топках котлов / А.Г. Михайлов // Омский научный вестник. 2008. – №3(70). – С. 81–84.
3. Михайлов А.Г. Вопросы теплообмена в топках газотрубных котлов. Обзор методов расчёта / А.Г. Михайлов // SWorld. – 2013. – С.1.
4. Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок / Б.П. Устименко, Б.К. Алияров, Е.К. Абубакиров. – Алма-Ата: Наука. 1982. – 212 с.
5. Устименко Б.П., Джакубов К.Б., Кроль В.О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных технологических устройствах / Б.П. Устименко, Б.К. Алияров, Е.К. Абубакиров. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 224 с.
6. Алексеенко С.В. Численное и экспериментальное моделирование турбулентных течений в топочных камерах / С.В. Алексеенко, И.Н. Гусев, В.М. Ерошенко, В.Б. Рабовский // Инж.-физ. Журн. 1990. – Т.5, – №6. – С. 948–955.
7. Пашков Л.Т. Основы теории горения: Учебное пособие / Л.Т. Пашков – М.: МЭИ (ТУ). 2002. – 125 с.
8. Басок Б.И., Демченко В.Г., Мартыненко М.П. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичным излучателем / Б.И. Басок, В.Г. Демченко, М.П. Мартыненко // Промышленная теплотехника. 2006. – №1. – С. 17–22.
9. Тайлашева Т.С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР / Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. 2014. – №3(13). – С. 11–15.
10. Герман М.Л., Бородуля В.А., Ноготов Е.Ф., Пальченко Г.И. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубных котлов с тупиковой топкой / М.Л. Герман, В.А. Бородуля, Е.Ф. Ноготов, Г.И. Пальченко // Тепломассообмен ММФ-2000: Труды IV Минского Междунар. форума. – Минск, 2000. Т.2. – С. 21–30.
11. Хаустов С.А., Заворин А.С., Фисенко Р.Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т.322, – № 4. – С. 43–47.
12. Осинцев К.В. Учёт неоднородности и нестабильности тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2007. – №6. – с. 66–70.
13. Долинский А.А., Халатов А.А., Кобзарь С.Г., Назаренко О.А., Мещеряков А.А. Использование компьютерного моделирования при малозатратной модернизации котла ниисту-5 / А.А. Долинский, А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь, О.А. Назаренко, А.А. Мещеряков // Пром. теплотехника. –2007. – Т. – 29, №5. – С. 80–91.

14. Халатов А.А., Кобзарь С.Г. Компьютерные технологии в модернизации котлов и камер сгорания / А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь // *Аква-Терм.* – 2007. – №1. – С.12–15.
15. Askarova A.S., Karpenko E.I., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.V. Optimization of the combustion of power-station technologies / A.S. Askarova, E.I. Karpenko, I.V. Loktionova, V.E. Messerle, A.V. Ustimenko // *Thermal Engineering.* – 2004. Vol.51. – №6. – P. 488–493.
16. Щелоков В.И., Ладыничев В.В., Лисейкин И.Д., Тодорович А.В. Модернизация водогрейных водотрубных котлов типа ПТВМ и КВГМ / В.И. Щелоков, В.В. Ладыничев, И.Д. Лисейкин, А.В. Тодорович. // *Новости теплоснабжения.* – 2004. – №5(45).
17. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Исследование образования вредных веществ в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ / А.С. Аскарлова, С.А. Болегенова, В.Ю. Максимов // VIII Всероссийская конф. «Горение твёрдого топлива». Новосибирск, РФ. 2012. – С. 9.1–9.4.
18. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир. 1990. – Т. 1. – 384 с.
19. Jakobsen H.A. Chemical Reactor Modeling / H.A. Jakobsen. – Springer. 2008. – P. 1244.
20. Peters N. Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press. 2000. – P. 304.
21. Суржииков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы / С.Т. Суржииков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.
22. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 502 с.
23. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
24. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. – 232 с.

Bibliography (transliterated)

1. Blokh A.G. (1984), Heat transfer in furnaces of steam boilers [Теплообмен в топках паровых котлов, Энергоатомиздат], Energyatompublishing, Leningrad, 240 pp.
2. Mikhailov A.G. (2008), “Methods for calculating heat transfer in boiler furnaces” [Metody rascheta teploobmena v topkakh kotlov, Omskii nauchnyi vestnik], Omsk Scientific Bulletin, №3 (70), Omsk, p. 81–84.
3. Mikhailov A.G. (2013), “Problems of heat transfer in furnaces-tube boilers. Review of calculation methods” [Voprosy teploobmena v topkakh gazotrubnykh kotlov. Obzor metodov rascheta], SWorld, Omsk.
4. Ustimenko B.P., Aliyarov B.K., Abubakirov Y.K. (1982), “The fire simulation of coal-fired furnaces” [Ognevoe modelirovanie pyleugolnyh topok, Nauka], Science, Alma-Ata, p. 212.
5. Ustimenko B.P., Dzhakubov K.B., Kroll V.O. (1986), “Numerical modeling of aerodynamics and combustion flue technological devices” [“Chislennoe modelirovanie aerodinamiki i gorenija v topochnyh tekhnologicheskikh ustroistvah”, Nauka], Science, Alma-Ata, p. 224.
6. Alekseenko S.V., Gusev I.N., Eroshenko V.M. Rabovsky V.B. (1990), “Numerical and experimental modeling of turbulent flows in the combustion chamber” [“Chislennoe i

experimentalnoe modelirovanie turbulentnyh techenii v topochnykh kamerah”, *Inzhenerno-Fizicheskii zhurnal*, Journal of Engineering Physics and Thermophysics., V.5. №6, p. 948–955.

7. Pashkov L.T. (2002), *Fundamentals of combustion theory: Textbook* [“Osnovy teorii goreniiya: Uchebnoe posobie”], Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, 125 pp.

8. Basok B.I., Demchenko V.G. Martynenko M.P. (2006), "Numerical modeling of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary emitter" [“Chislennoe modelirovanie processov aerodinamiki v topke vodogreynogo kotla s vtorichnym izluchatelem”], *Promyshlennaya teplotekhnika*, Industrial heating engineering, №1, p. 17–22.

9. Taylasheva T.S. (2014), "Analysis of operating experience DKVR type boilers" [“Analiz opyta expluatacii kotlov tipa DKVR”], *Vestnik nauki Sibiri*, Journal of Siberian science, №3 (13) P. 11–15.

10. Herman M.L., Borodulya V.A., Nogotov E.F., Palchenok G.I. (2000), "Engineering calculation method of temperature fire-tube boilers with a combustion chamber deadlock" [“Inzhenernyi metod rascheta temperaturnogo rejyma jarotrubnyh kotlov s tupikovoi topkoi”], *Trudy IV Minskogo Mejdunarodnogo foruma*, Proceedings of IV Minsk International forum, Minsk, V.2., p. 21–30.

11. Khaustov S.A., Zavorin A.S., Fissenko R.N. (2013), "Numerical study of processes in the fire tube furnace with reversible flame" [“Chislennoe issledovanie processov v jarotrubnoi topke s reversivnym fakelom”], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, Proceedings of the Tomsk Polytechnic University, Volume 322, number 4, 43–47.

12. Osintsev K.V., Osintsev V.V., (2007), "Accounting for heterogeneity and instability of the thermal structure of fuel flare using multifunction torch" [Uchet neodnorodnosti i nestabilnosti teplovoi struktury topochnogo fakela pri ispolzovanii mnogofunkcionalnykh gorelok”, *Teploenergetika*, Thermal Engineering, №6, p. 66–70.

13. Dolinsky A.A., Khalatov A.A., Kobzar S.G., Nazarenko O.A., Meshcheryakov A.A. (2007), "The use of computer modeling in low-cost modernization of boiler NIISTU-5" [“Ispolzovanie kompyuternogo modelirovaniya pri malozatratnoi modernizacii kotla NIISTU-5”], *Promyshlennaya teplotekhnika* Industrial Heat Engineering, T. 29, №5, p.80–91.

14. Khalatov A.A., Kobzar S.G. (2007), “Computer technologies in the modernization of boilers and combustion chambers” [“Kompyuternye tekhnologii v modernizacii kotlov i kamer sgoraniya”] *Aqua-Therm*, №1, p. 12–15.

15. Askarova A.S., Karpenko E.I., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.V., (2004), «Optimization of the combustion of power-station technologies», *Thermal Engineering*, Vol.51., №6, p. 488–493.

16. Schelkov V.I., Ladynichev V.V., Liseikin I.D., Todorovich A.V. (2004), “Modernization of the hot-water water-tube boilers PTVM and KVGM” [Modernizaciya vodogreynykh vodotrubnyh kotlov tipa PTVM i KVGM] *heating News*, №5 (45).

17. Askarov A.S., Askarova S.A., Bolegenova S.A., Maksimov V.J. (2012), “Study of the formation of harmful substances in the combustion chamber BKZ-75 Shakhtinskaya heat and power plant” [“Issledovanie obrazovaniya vrednyh veshestv v kamere sgoraniya BKZ-75 Shakhtinskoi TEC”], VIII Vserossiiskaya conf. “Gorenie tverdogo topliva”], VIII All-Russian Conf. "The burning of solid fuel", Novosibirsk, pp. 9.1-9.4.

18. Anderson D., Tannehill J., Pletcher R. (1990), “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer” [“Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen”], Mir, Moscow, Volume 1, p. 384.

19. Jakobsen H.A. (2008), "Chemical Reactor Modeling", Springer, p. 1244.
20. Peters N. (2000), "Turbulent combustion", Cambridge University Press, p. 304.
21. Surzhikov S.T. (2004), "Thermal radiation of gases and plasma" ["Teplovoe izluchenie gazov i plazmy"], Publishing House of the MSTU. Bauman, Moscow, p. 544.
22. Fletcher C. (1991), "Computational methods in fluid dynamics" ["Vychislitelnye metody v dinamike jydкости"], Mir, Moscow, Volume 1, p. 502.
23. Patankar S. (1984), "Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics" [Chislennye metody resheniya zadach teploobmena dinamiki jydкости], Energoatomisdat], Energyatompublishing, Moscow, p. 152.
24. The heat calculation of boiler units. Standard method, (1973), ["Teplovoi raschet kotelnyh agregatov. Normativnyi metod"], Energy, Moscow, p. 232.

УДК 621.184.004

Редько А.О., Давіденко А.В., Павловський С.В., Кулікова Н.В., Редько І.О.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТОПЦІ ВОДОТРУБНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РІЗНОМУ ТЕПЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Наведено результати чисельного дослідження процесів теплообміну в топці парового котла ДЕ-10/14 з пальником ГМГ. Визначено структуру факела, наявність зворотних струмів і течій поблизу теплообмінних поверхонь топки котла. Показані поля розподілу температури, щільності променистого теплового потоку в топковому об'ємі при різних експлуатаційних режимах (100, 50 і 15 % паропродуктивності котла).

Redko A. O., Davidenko A. V., Pavlovskiy S. V., Kulikova N. V., Redko I. O.

NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN THE FURNACE WATER TUBE STEAM BOILERS DE-10/14 AT DIFFERENT HEAT CAPACITY

The results of numerical studies of heat transfer processes in a furnace boiler DE-10/14 with a burner of HMG given. Determined the structure of the torch, the presence of reverse currents and currents near the heat exchange surfaces of the boiler furnace. Showing field distribution of temperature, density of the radiant heat flow in the combustion volume at different operating conditions (100, 50 and 15 % of steam boiler).

УДК 662.997

Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Рябова І.Б., Горбунов К.О., Хурані Ж.С.

**ВИКОРИСТАННЯ ДВОКОНТУРНИХ ГЕЛІОУСТАНОВОК
ДЛЯ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Досвід, який накопичений різними країнами в області використання сонячної енергії, демонструє високі можливості простого перетворення цього виду енергії в теплову енергію, котра може успішно використовуватися для гарячого водопостачання, а також забезпечення різного роду технологічних і побутових потреб в різних галузях промисловості [1]. Широке впровадження систем сонячного тепло- і холодопостачання на об'єктах цивільного і промислового будівництва стримується високою металоємністю та собівартістю геліоколекторів. Використання устаткування, яке дорого коштує, може бути рентабельним лише при інтенсивній його експлуатації протягом календарного року, а не посезонно. Тому, на наш погляд, актуальною є концепція створення нових конструкцій сонячних установок, коли витрати на вироблення теплової енергії за допомогою цих установок будуть нижче за рівень сумарних витрат на отримання теплової енергії традиційними способами (зокрема, в котельних установках). Одночасно з цим термін окупності сонячних установок повинен бути спільномірний з гарантійним терміном їх експлуатації. Для виконання поставлених умов є доцільною розробка таких конструкцій сонячних колекторів, які дозволяли би мінімізувати витрати на їх виготовлення, монтаж, обслуговування і ремонт. Це може досягатися за рахунок використання дешевих вітчизняних матеріалів, випуск яких гарантований в достатніх об'ємах протягом тривалого терміну в Україні. У зв'язку з цим надається велика увага розробці і впровадженню двоконтурних геліоустановок, перший контур яких виготовлений з полімерних матеріалів. Вартість геліоколекторів з полімерних матеріалів значно нижче (в десять разів) за вартість колекторів з різних металів. Введення в експлуатацію геліоустановок поліпшує екологічну ситуацію району споживання теплової енергії за рахунок зниження обсягів викидів забруднюючих речовин, до яких відносяться продукти згоряння традиційних видів енергії – органічного палива, що використовується для виробництва теплової енергії в котельному устаткуванні. При цьому для виробництва теплової енергії, яка використовується для нагрівання теплоносія з 8 до 90 °С, витрачається відповідна кількість органічного палива, яке має свою вартість. Тому економія органічного палива, яке необхідно для нагрівання теплоносія – також є актуальною задачею.

Хоча принципів економії органічного палива в технічній літературі зустрічається багато, але всі вони торкаються удосконалення котельного устаткування (пальникові пристрої, додаткові поверхні нагріву, газоходи і таке інше). Однак в технічній літературі практично відсутні публікації, які стосуються поетапного нагрівання теплоносія за рахунок інших джерел енергії і економії органічного палива при цьому.

В даній роботі авторами пропонується двоконтурна геліоустановка для гарячого водопостачання в різних районах України. Геліоустановка дозволяє більш ефективно використовувати сонячне випромінювання для нагрівання теплоносія в опалювальних котельнях малої потужності і відповідно зменшити витрати органічного палива.

Для рішення вищевказаних задач нами була розроблена схема попереднього нагріву теплоносія за рахунок застосування двоконтурної геліоводонагрівної установки [2].

Геліоустановка складається з першого та другого контурів. Перший контур складається з розробленого нами тонкоплівкового геліоколектора безнатискного типу [3] з полімерної плівки 1, з'єднаного трубопроводами з баком-акумулятором 4 і одним з контурів теплообмінного пристрою 3. Теплоносій в першому контурі подається в колектор насосом 2. Геліоколектор легко встановлюється, розбирається, очищується, замінюється. Застосування тонкоплівкових геліоколекторів безнатискного типу з полімерної плівки, рецептура якої також була розроблена нами, дозволяє зменшити ризик втрати дорогого теплоносія за рахунок розриву геліоколектора від надлишкового тиску. По ефективності нагріву теплоносія на вході в колектор та на його виході, геліоколектор з полімерної плівки поглинає більше сонячного випромінювання, ніж відомі колектори з металу, тим самим, забезпечує нагрів теплоносія до більш високої температури (85 °С), ніж колектор, що виготовлений з металу (63 °С). Геліоколектор з полімерної плівки, запропонований нами, можна замінити у разі потреби при засмічуванні прохідних перерізів чи почистити і це буде коштувати значно дешевше зрівняно з витратами на подібні операції для колекторів з металу. Застосування колекторів з полімерної плівки дозволяє зменшити вартість і матеріалоємність геліоустановки у цілому. Другий контур складається з: другого контуру теплообмінного пристрою 3; насоса 5; бака-акумулятора 6; установки хімоводоочищення 7; котельного устаткування (тепловий дублер) 8.

Принципову схему двоконтурної геліоустановки наведено на рисунку 1.

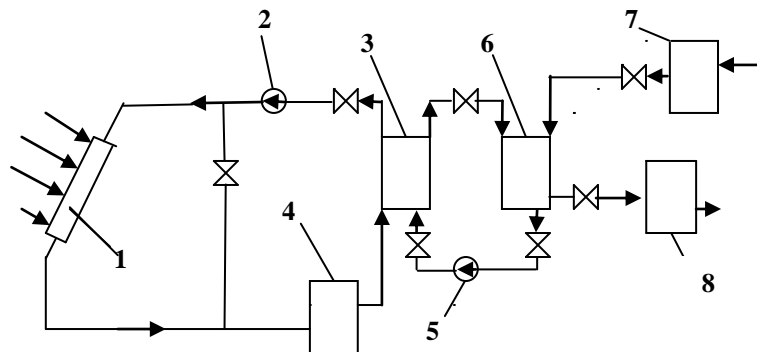


Рисунок 1 – Принципова схема двоконтурної геліоустановки

Геліоустановка працює таким чином. В першому контурі геліоустановки теплоносієм є рідина, яка замерзає при низькій температурі – антифриз. Насосом 2 антифриз з бака-акумулятора 4 через теплообмінний пристрій 3 подається в геліоколектор 1, в якому нагрівається до необхідної температури. Взимку, навесні та восени, коли нема достатньої сонячної інсоляції, геліоколектор нагріває антифриз з 8 до 40 °С, а влітку, коли є достатня сонячна інсоляція – до 85 °С. При цьому відповідно є можливість економити органічне паливо, яке пішло би на нагрівання теплоносія до вище вказаної температури. В другому контурі геліоустановки теплоносієм є вода, яка подається з магістрального трубопроводу в установку хімоводоочищення 7, в якій очищується до необхідної чистоти і подається в бак-акумулятор 6. Насосом 5 по трубопроводам вода пода-

ється у другий контур теплообмінного пристрою 3. Вода з бака-акумулятора 6 подається у тепловий дублер (котельне устаткування) 8, де догрівається до більш високої температури і далі подається споживачам гарячої води. Всіма режимами роботи геліоустановки керує система автоматизованого управління (САУ)

Таким чином, теплова енергія встановленої двоконтурної геліоустановки ΔQ_1 розраховується по рівнянню.

$$\Delta Q_{II} = \Delta Q_1. \quad (1)$$

Значення кількості використаної теплоти для попереднього підігріву води визначали за формулою [4]:

$$\Delta Q_1 = G_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (2)$$

де G_B – загальна витрата води, що підігрівається, м³/с; ρ_B – щільність води, кг/м³; c_B – теплоємність води, кДж/(м³К); t_B', t_B'' – температура холодної та підігрітої води, відповідно, °С.

Економію палива ΔB в котлоагрегаті за рахунок використання такої системи можна розрахувати за допомогою рівнянь теплового балансу (1)–(2) [5], а збільшення коефіцієнта використання палива $\Delta \eta_{ВП}$, % можна знайти як:

$$\Delta \eta_{ВП} = \frac{\Delta Q_{II}}{\Delta B \cdot Q_H^P} \cdot 100. \quad (3)$$

Тут ΔB – витрата органічного палива, кг/с (м³/с); Q_H^P – теплота згоряння палива, кДж/кг (кДж/м³).

Річна економія умовного палива складе, т.у.п./рік:

$$\Delta B_{рік} = \frac{Q_{рік}}{Q_{НВП}^P \cdot \eta_K}, \quad (4)$$

де $Q_{НВП}^P = 29,33$ МДж/кг – теплотворна здатність умовного палива; $Q_{рік}$ – річна кількість утилізованої теплоти, МДж/рік; η_K – коефіцієнт корисної дії котла.

Економія органічного палива дорівнює, т/рік (тис. м³/рік):

$$\Delta B = \Delta B_{рік} \cdot \frac{29,33}{1000 \cdot Q_H^P}. \quad (5)$$

Річна економія за рахунок скорочення витрати первинного палива для підігріву води складе для котельні, грн/рік:

$$E_T = \Delta B \cdot C_T, \quad (6)$$

де C_T – вартість первинного палива, грн/т (грн/1000 м³).

Були проведені розрахунки ефективності використання даної схеми гарячого водопостачання для котельні з водогрійними котлами типу КВГ-7,56 тепловою потужністю 6,5 Гкал/год. При кількості утилізованої теплоти 30,41 МВт/добу та часу роботи 2600 год/рік, річна економія палива може скласти приблизно 299,5 т.у.п./рік. Термін окупності досягає до 1,5 року. Для опалювальних котелень, що обладнані водогрійними котлами малої потужності, збільшення коефіцієнту використання палива складає від 4 до 7 %.

Таким чином, застосування в сукупності у схемі геліоустановки тонкоплівкових геліоколекторів плоско-капілярного безнатискного типу з полімерної плівки, які легко встановлюються, розбираються, очищуються, замінюються, системи автоматизованого управління (САУ), яка керує всіма режимами роботи геліоустановки, дозволяє: удосконалити діючі геліоустановки; зменшити ризик втрати дорогого теплоносія за рахунок розриву геліоколектора від надлишкового тиску; поглинати більше сонячного випромінювання ніж відомі колектора з металу, тим самим, забезпечити нагрівання теплоносія до більш високої температури (85 °С) ніж колектор, виготовлений з металу (63 °С); зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріалоемності та витрат на використовуване устаткування; економити органічне паливо; зменшити теплове навантаження та забруднення довкілля.

Література

1. Концепция государственной энергетической политики Украины на период до 2020 г. // Информационное приложение. – 2001. – № 10. – 8 с.
2. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
3. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухкало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экотехнологии и ресурсосбережение.– Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004.– с. 70–75.
4. Тарадай А.М. Основы разработки пластинчатых теплообменников для систем теплоснабжения.– Харьков: Основа, 1998. – 192 с.
5. Тепломассообменные аппараты и установки промышленных предприятий / Под. ред. Б.О. Левченко. –Ч.1. – Харьков: ХДПУ, 1999. – 395 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kontseptsiya gosudarstvennoy energeticheskoy politiki Ukrainyi na period do 2020 g. // Informatsionnoe prilozhenie. – 2001. – # 10. – 8 p.
2. Dvokonturna gellovodonagrivna ustanovka, Patent UkraYini, # 64198 A, Byul. # 2, 2004.
3. Selihov Yu.A., Ved V.E., Buhkalo S.I., Kostin V.M. Konstruktsionnyie osobennosti uvelicheniya effektivnosti raboty gelioustanovok. Ekotehnologii i resur-sosberezhenie.– Kiev: Tipografiya NAN Ukrainyi, # 3, 2004.– p. 70–75.

4. Taraday A.M. Osnovi razrabotki plastinchatyih teploobmennikov dlya sistem teplosnabzheniya.– Harkov: Osnova, 1998.

5. Teplomassoobmennyye apparaty i ustanovki promyishlennyih predpriyatiy / Pod. red. V.O. Levchenko. –Ch.1. – Harkov: HDPU, 1999. – 395 p.

УДК 662.997

Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Рябова И.Б., Горбунов К.А., Хурани Ж.С.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКОНТУРНЫХ ГЕЛИОУСТАНОВОК ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Применение в совокупности в схеме двухконтурной гелиоустановки: тонкопленочных гелиоколлекторов плоско-капиллярного безнапорного типа из полимерной пленки, которые легко устанавливаются, разбираются, очищаются, заменяются; системы автоматизированного управления (САУ), которая руководит всеми режимами работы гелиоустановки, позволяет: усовершенствовать действующие гелиоустановки; поглощать больше солнечного излучения чем известны коллектора из металла, тем самым, обеспечить нагревание теплоносителя к более высокой температуре (85 °С) чем коллектор, изготовленный из металла (63 °С); уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет уменьшения стоимости и материалоемкости используемого оборудования; упростить схему нагрева теплоносителя; экономить органическое топливо, а также уменьшить тепловую нагрузку и загрязнение окружающей среды.

Selikhov Ju.A., Kotsarenko V.A., Ryabova I.B., Gorbunov K.A., Хурани Ж.С.

USE TWOCONTOUR HELIOMOUNTINGS FOR HOT WATER-SUPPLY

Application in an aggregate in the chart of twocontour heliomounting: thinlyfilm heliocollector flat-capillary nonpressure type from polymeric tape, which are easily set, understood, cleared up, replaced; system of the automated management, which manages all modes of operations of heliomounting, allows: to perfect operating heliomountings; to take in more of sun radiation than known collectors from a metal, the same, to provide heating of heat-transfer to more high temperature (85 °С) than the collector made from a metal (63 °С); to decrease the prime price of thermal energy due to reduction of cost and materials consumption apply equipment; to simplify the chart of heating of heat-transfer; to save an organic fuel, and also decrease the thermal loading and contamination of environment.

УДК 658.264

Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П., Ландар А.А., Бурда О.С.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕХОДА К ДВУХТРУБНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Экономическая эффективность перехода к двухтрубным микрорайонным тепловым сетям определяются как параметрами тепловой сети (способ прокладки, характеристики тепловой изоляции, протяженность теплопроводов), что определяет уровень теплотерь при транспортировке теплоты, так и показателями работы установок для горячего водоснабжения (площадь поверхности теплопередачи, расход сетевой воды). Наиболее применяемыми в схемах центральных тепловых пунктов являются двухступенчатые установки, позволяющие снизить расход сетевой воды для нужд горячего водоснабжения [1]. В работах [2,3] проведена оценка изменения показателей водоподогревателей при условии, что в исходном варианте (общемикрорайонная водоподогревательная установка при четырехтрубной сети) предусмотрена двухступенчатая смешанная схема присоединения теплообменников горячего водоснабжения к тепловым сетям, применяемая при соотношении максимальных тепловых нагрузок горячего водоснабжения и отопления $0,6 \leq \gamma_{\max} = Q_{h,\max} / Q_{o,\max} \leq 1$. В диапазоне соотношения нагрузок $0,3 \leq \gamma_{\max} < 0,6$ рекомендована к применению двухступенчатая последовательная схема [1], обеспечивающая, в сравнении с другими схемами, минимальный расход сетевой воды через тепловой пункт.

Целью работы является оценка изменения площади поверхности теплообмена водоподогревателей и расхода сетевой воды при переходе к двухтрубным микрорайонным тепловым сетям при условии, что в исходном варианте исполнения системы теплоснабжения микрорайона была предусмотрена двухступенчатая последовательная схема присоединения теплообменников горячего водоснабжения к тепловым сетям. Теплообменники горячего водоснабжения, устанавливаемые на индивидуальных тепловых пунктах зданий при переходе к двухтрубным микрорайонным сетям, присоединены по одноступенчатой параллельной схеме.

Теплопроизводительность теплообменников первой ступени для двухступенчатой последовательной схемы принято определять по балансовой нагрузке горячего водоснабжения, второй ступени – по разности максимального расхода тепла на горячее водоснабжение ($Q_{h,\max}$) и производительности первой ступени [1]

$$Q_1 = G_{h,cp} \cdot K_B \cdot (t_{h1} - t_x) \cdot C; \quad (1)$$

$$Q_2 = Q_{h,\max} - Q_1. \quad (2)$$

В приведенных уравнениях $G_{h,cp}$ – среднечасовой расход нагреваемой воды; K_B – поправочный коэффициент для компенсации небаланса тепла на отопление, вызываемого неравномерностью суточного графика водопотребления (при отсутствии в

системе баков-аккумуляторов $K_B = 1, 2$); t_x, t_{h1} – температура холодной воды и нагреваемой воды после первой ступени соответственно; C – удельная теплоемкость воды.

Расчетный расход сетевой воды на ввод в центральный тепловой пункт с учетом отопительной нагрузки определяют по формуле [1]

$$G_{h,cp} = \frac{Q_o' + \frac{Q_{h,cp}}{1 + K_{ТП}} \left(K_B \cdot \frac{55 - t_{h1}}{55 - t_x} + K_{ТП} \right)}{(\tau_1' - \tau_2') \cdot C}, \quad (3)$$

где Q_o' – расход теплоты на отопление при температуре наружного воздуха в точке излома графика температур; $Q_{h,cp} = Q_{h,max} / K_q$ – средний расход тепла на горячее водоснабжение; K_q – коэффициент часовой неравномерности водопотребления; $K_{ТП}$ – коэффициент для учета потерь тепла трубопроводами системы (при наличии наружных распределительных сетей горячего водоснабжения от ЦТП $K_{ТП} = 0,35$); τ_1', τ_2' – соответственно, температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах теплосети в точке излома графика температур.

Расчетную температуру сетевой воды на выходе из подогревателей первой ступени определяют с учетом того, что на входе в подогреватели она равна температуре воды на выходе из системы отопления в точке излома графика температур (τ_2') [4]

$$\tau_{21} = \tau_2' - \frac{Q_1}{G_c^p \cdot C}. \quad (4)$$

Температуру сетевой воды на выходе из подогревателей второй ступени находят из условия, что в расчетном режиме вся сетевая вода проходит через водоподогреватель

$$\tau_{22} = \tau_1' - \frac{Q_2}{G_c^p \cdot C}. \quad (5)$$

Температуру нагреваемой воды на входе в аппараты второй ступени определяют из выражения

$$t_{h2} = t_r - \frac{Q_2}{G_{h,max} \cdot C}, \quad (6)$$

где t_r – температура горячей воды; $G_{h,max}$ – максимальный расход подаваемой воды.

С учетом полученного в [2] выражения для расхода сетевой воды через индивидуальные тепловые пункты зданий при одноступенчатом присоединении теплообменников горячего водоснабжения, формула для оценки изменения расхода сетевой воды при переходе к двухтрубным тепловым сетям имеет вид

$$\frac{\sum_{i=1}^n G_i}{G_c^p} = \frac{1}{A} \left[0,093 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n m_i^{0,817}}{m} + \frac{1}{\gamma_{\max} (\tau_1^p - \tau_2^p)} \right]; \quad (7)$$

$$A = \frac{0,0122}{\gamma_{\max}} + (11,83 - 0,195 \cdot t_{h1}) \cdot 10^{-3},$$

где m_i – число потребителей, получающих горячую воду от данного ИТП; m – общее число потребителей воды в микрорайоне; τ_1^p, τ_2^p – расчетная температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах теплосети, n – число зданий.

Формула (7) получена с учетом того, что расход теплоты на отопление при температуре наружного воздуха в точке излома графика температур и максимальный (расчетный) связаны соотношением

$$Q_o = Q_{o,\max} \cdot \frac{t'_e - t'_n}{t_e - t_{p,o}}, \quad (8)$$

где t_e – температура внутреннего воздуха в помещении; $t_{p,o}, t'_n$ – температура наружного воздуха расчетная для отопления и в точке излома температурного графика соответственно.

В расчетах приняты значения температур $\tau_1^p = 150$ °С, $\tau_2^p = 70$ °С, $t'_n = 3,5$ °С, $t_e = 18$ °С, $t_{p,o} = -23$ °С, $\tau_1' = 77$ °С, $\tau_2' = 42$ °С, $25 \leq t_{h1} \leq 35$ °С и диапазон изменения соотношения тепловых нагрузок $0,3 \leq \gamma_{\max} \leq 0,6$. При вычислениях рассмотрены варианты застройки идеализированных жилых групп, характеристики которых приведены в табл. 1. Результаты расчетов для значения температуры нагрева воды в теплообменниках первой ступени $t_{h1} = 35$ °С приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Характеристики расчетных вариантов

Показатель	Номер варианта			
	1	2	3	4
Количество жилых домов в группе, n	50	20	10	3
Количество жителей в одном доме, m_o , чел	200	500	1000	3333

Полученные результаты свидетельствуют о незначительном влиянии температуры нагрева воды на первой ступени на величину соотношения расходов сетевой воды. Различия для $t_{h1} = 35$ °С и $t_{h1} = 25$ °С находятся в пределах 1–4 %, поэтому в диапазоне возможных расчетных значений t_{h1} и γ_{\max} следует ожидать увеличения требуемого расхода сетевой воды примерно в 1,5–2,2 раза.

Таблица 2 – Соотношение расходов сетевой воды для жилых групп

Соотношение максимальных тепловых нагрузок, γ_{\max}	Номер варианта			
	1	2	3	4
0,3	1,67	1,55	1,48	1,37
0,4	1,87	1,72	1,62	1,47
0,5	2,05	1,86	1,74	1,57
0,6	2,21	2,0	1,86	1,65

Общая площадь теплообмена водоподогревательной установки найдена как сумма площадей аппаратов ступеней, которые вычислены из уравнения теплопередачи по расчетной теплопроизводительности

$$F = F_1 + F_2 = Q_{h,\max} \left(\frac{A_1}{K_1 \cdot \Delta t_1} + \frac{1 - A_1}{K_2 \cdot \Delta t_2} \right); \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{K_B}{K_G} \cdot \frac{t_{h1} - t_x}{t_G - t_x},$$

где K_1, K_2 – коэффициенты теплопередачи для теплообменников, соответственно, первой и второй ступени; $\Delta t_1, \Delta t_2$ – средняя логарифмическая разница температур теплоносителя и нагреваемой воды на ступенях.

Для одноступенчатой схемы присоединения теплообменников горячего водоснабжения к теплосети, используемой при оборудовании индивидуальных тепловых пунктов зданий, суммарную площадь поверхности теплообмена подогревателей горячей воды с достаточной степенью точности можно определить по формуле [3]

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0,108 \sum_{i=1}^n m_i^{0,817}, \quad (10)$$

где m_i – число жителей в здании; n – число зданий.

Изменение площади поверхности теплообменников при переходе от микрорайонной водоподогревательной установки, собранной по двухступенчатой последовательной схеме, к схеме с приготовлением горячей воды на ИТП зданий можно оценить по формуле

$$\frac{\sum_{i=1}^n F_i}{F} = \frac{0,108 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{A_1 \cdot K_2 \cdot \Delta t_2 + (1 - A_1) K_1 \cdot \Delta t_1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n m_i^{0,817}}{m}. \quad (11)$$

С использованием полученных формул выполнены расчеты для идеализированных групп жилых зданий (табл.1) в предположении, что коэффициенты теплопередачи

для теплообменных аппаратов ступеней ВПУ и подогревателей, установленных на индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) одинаковы, т.е. $K_1 = K_2 = K = 1300 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Вычисления выполнены при следующих условиях: $K_B = 1,2$; $K_G = 2,6$; $t_G = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_x = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, диапазон изменения соотношения тепловых нагрузок $0,3 \leq \gamma_{\max} \leq 0,6$. диапазон изменения температуры нагрева воды на первой ступени $25 \leq t_{h1} \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Приведенные графические зависимости свидетельствуют, что при соотношении исходных максимальных тепловых нагрузок $\gamma_{\max} > 0,4$ и числе жителей $m_o > 200$ следует ожидать уменьшения теплообменной поверхности подогревателей горячей воды. Рост площади поверхности теплопередачи отмечен при $\gamma_{\max} = 0,3$ и числе потребителей горячей воды, обслуживаемых одним ИТП, $m_o < 400$. Практически это значит, что при переходе на двухтрубную систему теплоснабжения в случае застройки жилой группы девятиэтажными зданиями с числом секций 4 и более не следует ожидать увеличения суммарной площади поверхности устанавливаемых на ИТП теплообменных аппаратов при переходе на двухтрубную систему теплоснабжения.

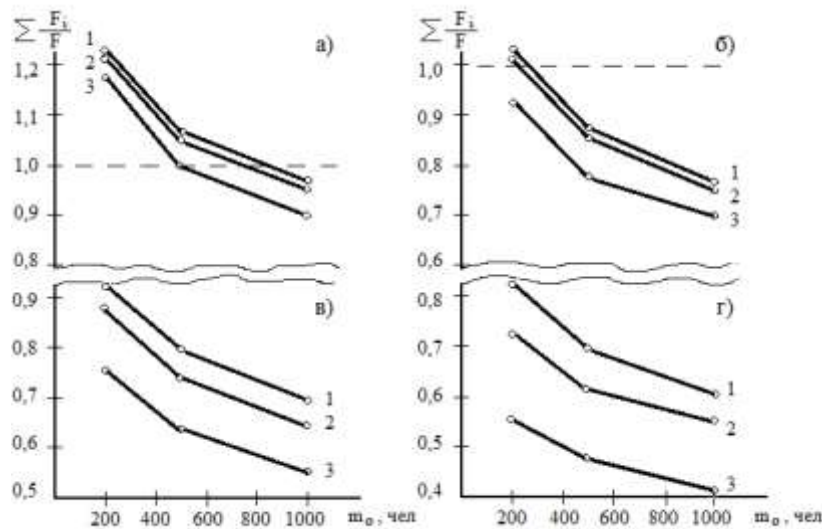


Рисунок 1 – Влияние количества потребителей горячей воды на изменение площади теплообмена подогревателей
 а) – $\gamma_{\max} = 0,3$; б) – $0,4$; в) – $0,5$; г) – $0,6$;
 1 – $t_{h1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t_{h1} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $t_{h1} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Сопоставление теплообменных поверхностей, требуемых к установке на ИТП зданий для двухступенчатых смешанной и последовательной схем присоединения выполнено на рис. 2. Сравнение проведено для рекомендованных для каждой из схем диапазонов изменения соотношения максимальных тепловых нагрузок горячего водоснабжения и отопления ($0,3 \leq \gamma_{\max} \leq 0,6$ для последовательной и $0,6 \leq \gamma_{\max} \leq 1$ для смешанной) и наиболее вероятном значении температуры $t_{h1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

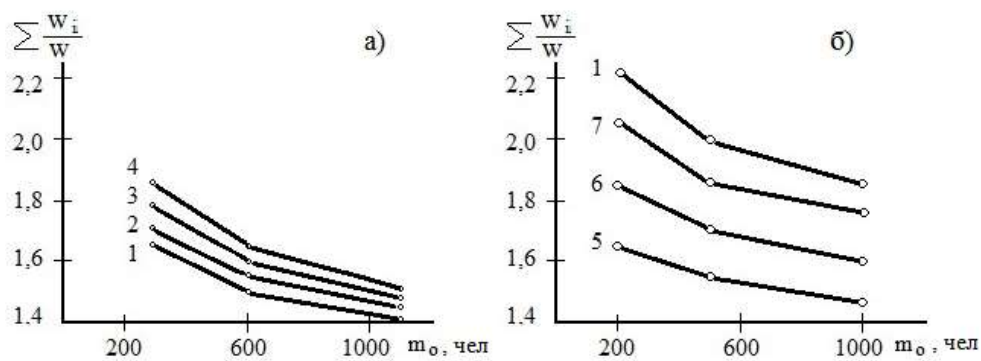


Рисунок 2 – Влияние количества потребителей горячей воды на изменение расхода сетевой воды через теплообменники горячего водоснабжения при $t_{h1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

а) – при двухступенчатой смешанной схеме присоединения микрорайонной установки (исходный вариант); б) – при двухступенчатой последовательной схеме; 1 – $\gamma_{max} = 0,6$; 2 – 0,7; 3 – 0,8; 4 – 1,0; 5 – 0,3; 6 – 0,4; 7 – 0,5

Выводы

1. Предложены формулы для оценки изменения площади теплопередачи подогревателей горячего водоснабжения и расхода сетевой воды при переходе к двухтрубной схеме теплоснабжения микрорайонов.

2. При использовании в исходном варианте исполнения микрорайонной водонагревательной установки (ВНУ) двухступенчатой смешанной схемы присоединения подогревателей при переходе к двухтрубной системе теплоснабжения микрорайона следует ожидать снижения суммарной площади поверхности теплообменников ИТП в сравнении с величиной поверхности исходной микрорайонной ВНУ.

3. При использовании в исходном варианте водонагревательной установки двухступенчатой последовательной схемы присоединения при $\gamma_{max} < 0,4$ и средней численности жителей в одном здании $m_o < 400$ возможен рост площади поверхности теплопередачи подогревателей горячего водоснабжения

Литература

1. Повышение эффективности работы систем горячего водоснабжения [Текст] / Н.Н. Чистяков, М.М. Грудзинский, В.И. Личак и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 314 с.
2. Алексахин А.А. Оценка изменения теплообменной поверхности водоподогревателей при переходе на двухтрубную микрорайонную систему теплоснабжения [Текст]. //Комунальне господарство міст. Наук.-тех. зб., вип.110, 2013, с.131–135.
3. Алексахин А.А. Изменение параметров подогревательных установок при переходе к двухтрубной системе теплоснабжения микрорайона [Текст]. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. №12(143), 2015, с. 2–7.
4. Повышение эффективности работы тепловых пунктов [Текст] / Н.М. Зингер, В.Г. Бестолченко, А.А. Жидков. – М.: Стройиздат, 1990. – 185 с.

Bibliography (transliterated)

1. Povyishenie effektivnosti raboty sistem goryachego vodosnabzheniya [Tekst] / N.N. Chistyakov, M.M. Grudzinskiy, V.I. Lichak i dr. – M.: Stroyizdat, 1988. – 314 p.
2. Aleksahin A.A. Otsenka izmeneniya teploobmennoy poverhnosti vodopodogrevateley pri perehode na dvuhtrubnyuyu mikrorayonnuyu sistemu teplosnabzheniya [Tekst]. // Komunalne gospodarstvo mIst. Nauk.-teh. zb., vip.110, 2013, p.131–135.
3. Aleksahin A.A. Izmenenie parametrov podogrevatelnyih ustanovok pri perehode k dvuhtrubnoy sisteme teplosnabzheniya mikrorayona [Tekst]. // Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit. #12(143), 2015, p. 2–7.
4. Povyishenie effektivnosti raboty teplovyih punktov [Tekst] / N.M. Zinger, V.G. Bestolchenko, A.A. Zhidkov. – M.: Stroyizdat, 1990. – 185 p.

УДК 658.264

Алексахін О.О., Єна С.В., Гордієнко О.П., Ландар А.О., Бурда О.С.

**ДО ПИТАННЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕХОДУ
ДО ДВОТРУБНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

Запропоновано формули для визначення площі поверхні теплопередачі і витрат мережної води при переході від чотиритрубною системи теплопостачання мікрорайону до двотрубною. Формули отримано при умові, що у вихідному варіанті теплообмінники гарячого постачання приєднано до теплових мереж за двоступінчастою послідовною схемою. На прикладі ідеалізованих груп житлових будівель проведено оцінки впливу кількості мешканців на зміну площі теплопередачі і витрат теплоносія.

Aleksakhin O.O., Yena S.V., Hordiienko O.P., Landar A.O., Burda O.S.

**ON EVALUATION OF EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY SYSTEM CHANGING IN-
TO TWO-PIPE SYSTEM**

The formulas have been proposed to determine the changes of heat transfer surface area and heat-system water consumption while four-pipe district heating system has been changed into two-pipe heating system. The formulas have been obtained under the condition that originally hot water supplying system heat exchangers and heating nets were connected by two-stage series scheme. The influence of district population on changes of heat transfer surface area and heat-system water consumption has been investigated taking into consideration idealized groups of residential buildings.

Левчук І.В., Кіщенко В.А., Тимченко В.К., Куниця К.В.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ БЕНЗ[А]ПІРЕНУ ТА СУМИ ПАВ В РОСЛИННИХ ОЛІЯХ

1. Вступ

Бенз[а]пірен – онкогенна речовина, що відноситься до поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), які утворюються при взаємодії високої температури на деякі органічні речовини. Як відомо, з практики підприємств олійножирової галузі, експортуючих рослинну олію, серед інших органічних екотоксикантів контролюється саме вміст бенз[а]пірену.

Удосконалення методів, розробки і впровадження сучасних методів визначення (ПАВ у оліях, олієжировмісних продуктах та насінні олійних культур є актуальним для здійснення контролю забруднення харчових продуктів.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

ПАВ є розповсюдженими забруднювачами рослинних олій та харчових продуктів на їх основі [1, 2].

Найважливішим щодо розповсюдження ПАВ в атмосфері є бенз[а]пірен, вміст якого становить більше 90 % від сумарних викидів усіх вуглеводнів. В рослинній олії та інші продукти ці сполуки потрапляють з навколишнього середовища [3]. Найбільш вірогідний шлях потрапляння ПАВ в насіння олійних культур – це сушка димовими газами, які містять продукти неповного згорання палива, у тому числі і ПАВ. Значна кількість ПАВ утворюються при спалюванні сміття, нафтопродуктів [4].

Наявність бенз[а]пірену в харчових продуктах розглядається як маркер забруднення канцерогенними ПАВ. На теперішній час в країнах ЄС приділяється багато уваги контролю безпеки олієжировмісних продуктів, в тому числі вмісту бенз[а]пірену в рослинних оліях. Директива Комісії ЄС 208/2005/ЄС жорстко регламентує вміст поліциклічних ароматичних вуглеводнів в харчових продуктах. Зокрема, вміст бенз[а]пірену в олії не повинен перевищувати 0,002 мг/кг [5].

Для захисту здоров'я споживачів необхідно максимально обмежити вміст бенз[а]пірену в харчових продуктах, особливо з підвищеним вмістом рослинних олій, жирів, модифікованих жирів, а також у продуктах, при виробництві яких процеси копчення або висушування можуть призвести до високого рівня забрудненості [6, 7].

Для визначення бенз[а]пірену використовують, як правило наступні хроматографічні методи: газорідинну хроматографію з полум'яно-іонізаційним детектором (ГРХ), газорідинну хроматографію з мас-селективним детектором (ГРХ/МС), високоефективну рідинну хроматографію з флуоресцентним детектором, високоефективну рідинну хроматографію з діодноматричним детектором (ВЕРХ/УФ) і флуоресцентним детектором, з'єднаних послідовно. Основні вимоги, які пред'являють до методів визначення ПАВ в оліях і олієжировмісних продуктах – висока чутливість і селективність.

Флуоресцентний і мас-селективний детектори мають високу селективність, в той час чутливість флуоресцентного детектора в 50–100 разів вище, ніж у мас-селективного, що дозволяє зменшити масу аналітичної проби, збільшити кінцевий об'єм підготовленої проби і призводить до значного зменшення впливу матриці на якість дослідження. Ультрафіолетовий і полум'яно-іонізаційний детектори не мають, а

ні високу чутливість, а ні високу селективність, у зв'язку з чим їх використання для проведення досліджень ПАВ обмежено дослідженням відносно простих за складом зразків з достатньо високим вмістом ПАВ (> 50 мкг/кг).

Європейські нормативи потребують використання більш чутливих та селективних методів, які дозволяють проводити кількісне визначення кожного ПАВ на рівні 1–5 мкг/кг.

Міжнародні стандарти (ISO 22959) встановлюють високоефективну рідинну хроматографію та метод on-line донорно-акцепторної комплексної хроматографії з флуоресцентним детектуванням, як методи для визначення ПАВ в оліях та олієжировмісних продуктах. Принцип визначення ПАВ в оліях та олієжировмісних продуктах за допомогою on-line донорно-акцепторної комплексної хроматографії і ВЕРХ з флуоресцентним детектуванням полягає в елююванні зразка олії через колонку з модифікованою стаціонарною фазою, яка виступає акцептором електронів, ця колонка утримує ПАВ. Після елюювання олії, ПАВ переносяться on-line в аналітичну колонку з оберненою фазою. Індивідуальні ПАВ визначаються на різних довжинах хвиль. Ідентифікація здійснюється за часом утримування. Кількісний аналіз здійснюється методом зовнішнього градування. Мінімальна межа кількісного визначення методу складає 0,1 мкг/кг [8]. Цей метод характеризується високою чутливістю та селективністю. Схему аналізатора ПАВ, на основі рідинного хроматографа, представлена в стандарті ISO 22959 наведено на рис. 1.

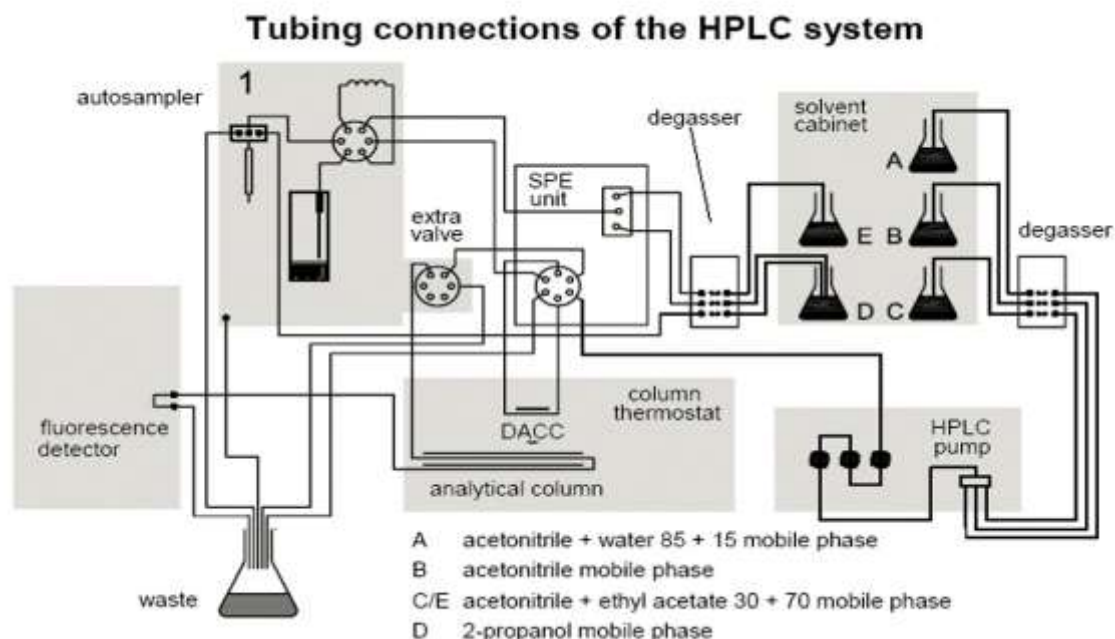


Рисунок 1 – Схема аналізатора ПАВ, на основі рідинного хроматографа, представлена в стандарті ISO 22959

Таким чином, необхідна гармонізація стандартів, що являє собою проведення стандарту та його змісту у відповідності з іншим стандартом для забезпечення взаємозамінності послуг, взаємного розуміння результатів випробувань і інформації, яка є в стандарті.

Оскільки, рослинні олії використовуються у виробництві харчових продуктів дуже широко, то для забезпечення їх безпеки існує необхідність у зниженні в них вмісту бенз[а]пірену.

3. Мета та задачі дослідження

Удосконалити технологічні процеси визначення ПАВ, удосконалити та модернізувати методи визначення бенз[а]пірену для забезпечення надійної ідентифікації та кількісного визначення його і тим самим забезпечити виконання прийнятої міжнародної норми, яка складає 2 мкг/кг, що дозволить не перевищити рівень допустимого ризику при використанні рослинних олій в харчовому раціоні і тим самим знизить ризик токсичної та канцерогенної дії ПАВ на організм людини.

4. Результати досліджень та їх обговорення

Конфігурація рідинного хроматографа та технологічна схема, представлена в стандарті ISO 22959 (рис. 1), передбачає використання двох градієнтних насосів, трьох кранів-перемикачів потоків і трьох хроматографічних колонок. Незважаючи на складність аналітичної системи, підготовка проб і сам аналіз за тривалістю досліджень складає 90 хвилин. При цьому виключаються будь-які втрати аналітів. Для підготовки проби пропонується розбавлення зразків ізопропанолом в різних пропорціях, залежно від природи олії або жиру [9]. Далі, зразок відфільтровують через фільтр (0,45 мікрон), після чого проба готова до досліджень.

На першій стадії підготовлена проба, за допомогою допоміжного насосу високого тиску і автосамплеру, вводиться в аналітичну систему і потрапляє безпосередньо на унікальну хроматографічну колонку донорно-акцепторної комплексної хроматографії (ДАСС) (80 x 3.0 мм x 5 мкм CP28159), яка заповнена сорбентом з яскраво вираженими π -акцепторними властивостями. Оскільки планарні молекули всіх ПАВ є π -донорами, між аналітом і сорбентом утворюються хімічні зв'язки, досить міцні, щоб відокремити ПАВ від матриці олії в потоці ізопропанолу.

На наступній стадії ізопропанол замінюється на елюент ацетонітрил/вода, відфільтровані ПАВ переносяться з ДАСС колонки на дві з'єднані послідовно хроматографічні колонки (Eclipse PAK 4,6 x 250 мм x 5 мкм каталожний номер 959990-918) і аналізуються за допомогою флуоресцентного детектора. Сам хроматографічний процес розподілу ПАВ відбувається з використанням основного градієнтного насосу.

Аналізуючи принцип роботи аналітичної системи (рис. 1), яка представлена в ISO 22959 нами було виявлено недоліки, а саме:

- наявність трьох кранів призводить до збільшення кількості капілярів, що спричинить до виникнення «мертвих» об'ємів, що призведе до розмивання піків аналітів;
- це – моноблочна система, яка розрахована лише під одне аналітичне завдання, а саме дослідження ПАВ.

Відповідно до аналітичних досліджень, які проводяться випробувальними лабораторіями, які здійснюють дослідження олій та жирів за показниками безпеки нами було удосконалено технологічну схему рідинного хроматографа на основі аналізатору Agilent 1200.

На рис. 2А та 2Б представлено схеми аналізатора ПАВ на основі рідинного хроматографа Agilent 1200 в режимі on та off (включений та виключений), яка дозволяє відтворити аналіз, описаний в стандарті ISO 22959.

В результаті досліджень нами встановлено переваги однокранової системи – це зменшена кількість капілярів, що призводить до зменшення кількості «мертвих» об'ємів та запобігає розмиванню хроматографічного профілю аналітів, що суттєво важливо при проведенні кількісного аналізу. Але недоліком даної системи є неможливість промивки ДАСС колонки зворотнім потоком елюенту на злив.

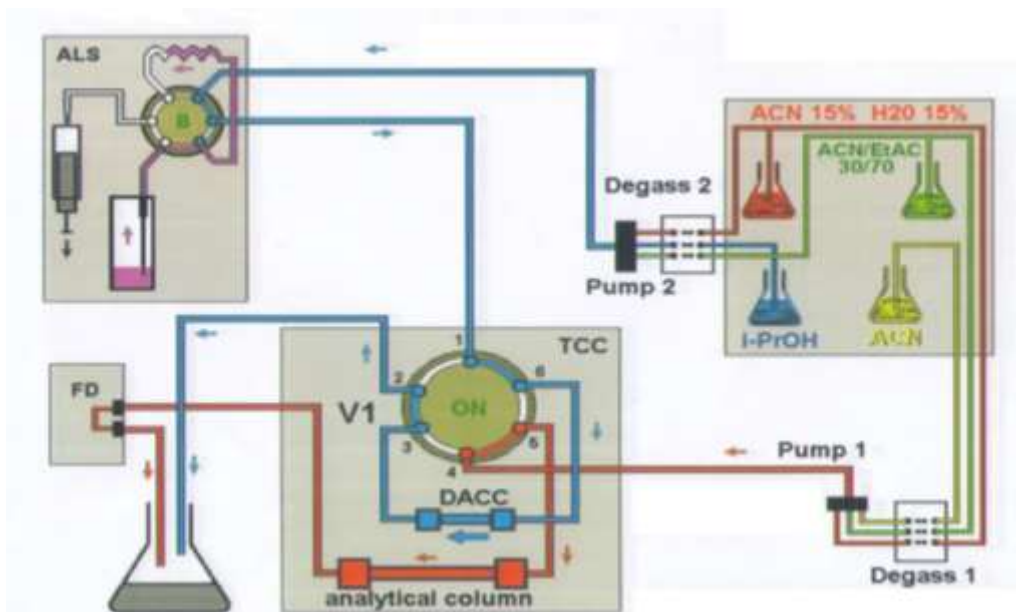


Рисунок 2А – Схема аналізатора ПАВ на основі рідинного хроматографа Agilent 1200 в режимі on, яка дозволяє відтворити аналіз, описаний в стандарті ISO 22959

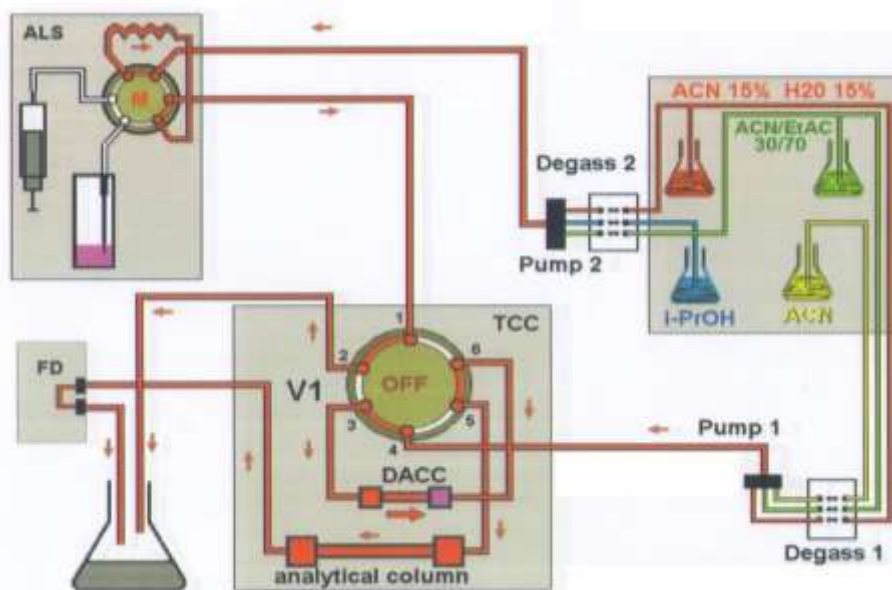


Рисунок 2Б – Схема аналізатора ПАВ на основі рідинного хроматографа Agilent 1200 в режимі off, яка дозволяє відтворити аналіз, описаний в стандарті ISO 22959

Градувальні графіки, побудовані для діапазону концентрацій 0,1–30 ppb, мають лінійну залежність. Межа виявлення для бенз[а]пірену становить приблизно 0,05 ppb, що більш ніж достатньо для проведення його точного кількісного аналізу на рівні, необхідному Європейським законодавством (2,0 ppb).

Досвід експлуатації приладу показав, що методика працює надійно. Крім зразків соняшникової олії методика була випробувана на рапсовій та пальмовій оліях. Оскільки, всі стадії і підготовка проб відбувається всередині однієї автоматизованої аналітичної системи різко зменшуються витрати і час на підготовку проби.

Індивідуальні ПАВ визначаються на різних довжинах хвиль. Ідентифікація здійснюється за часом утримування. Кількісний аналіз здійснюється методом зовнішнього

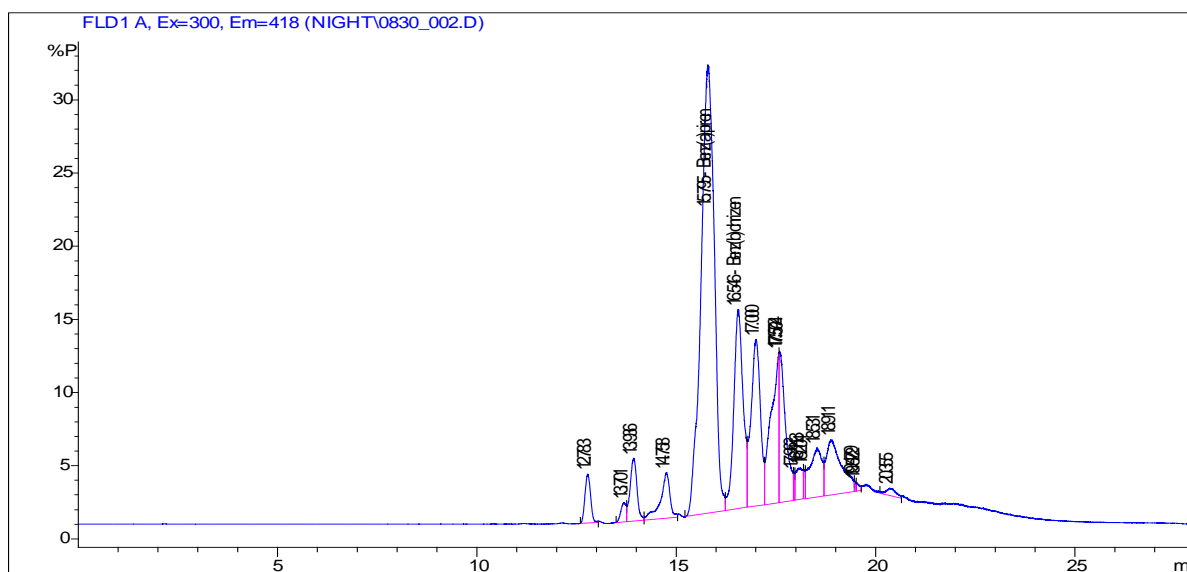


Рисунок 5 – Хроматограма олії соняшникової з вмістом бенз[а]пірену та інших ПАВ за ДСТУ 4689:2006, отримані методом ВЕРХ (флуоресцентний детектор)

Аналіз проведеного моніторингу насіння соняшника за 2011–2012 маркетинговий рік помісячно вказує на те, що вагомий внесок у збільшенні вмісту бенз[а]пірену має технологічний процес – сушіння або підсушування (рис. 6). Технологія сушіння на підприємствах може здійснюватись за різних температур. В залежності від вмісту вологи в насінні соняшника тривалість процесу і умови його сушіння змінюються, що впливає на адсорбцію поліциклічних ароматичних вуглеводнів. При використанні в процесі сушіння насіння соняшника активного вентиляювання рівень бенз[а]пірену зменшується. Виявлено, якщо в насінні соняшника до сушіння вміст бенз[а]пірену був 0,5 мкг/кг, то після сушіння вміст бенз[а]пірену збільшився до 3,5 мкг/кг, а після активного вентиляювання він зменшився до 2,5 мкг/кг. Отримані дані щодо зменшення вмісту бенз[а]пірену в квітні місяці у порівнянні з періодом з грудня 2011 р. по березень 2012 р. можна пояснити використанням технологій сушіння, підсушування, процесу активного вентиляювання [10, 11, 12].

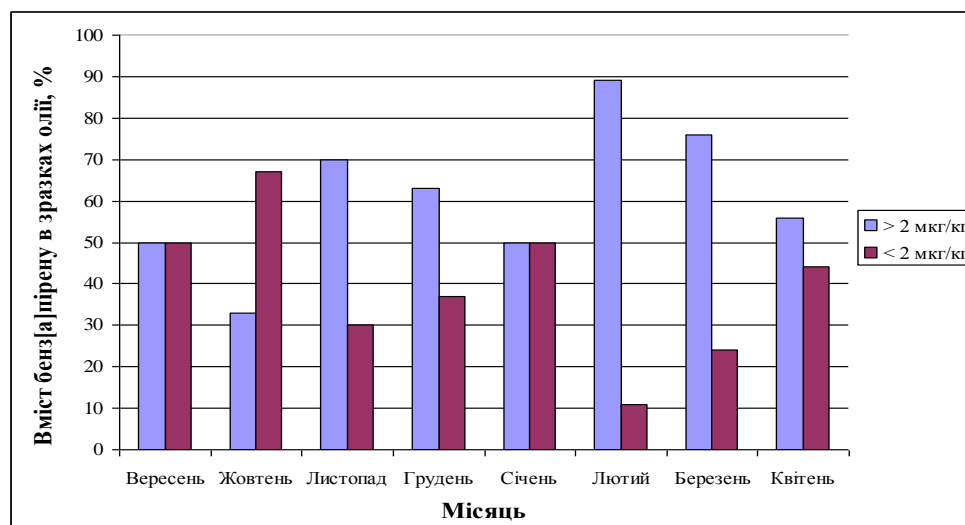


Рисунок 6 – Результати досліджень олії соняшникової за допомогою аналізатора Agilent 1200

При дослідженні олії соняшникової нерафінованої на вміст суми ПАВ (бенз(а)пірену, антрацену, флуорантрену, хризену) встановлена залежність ПАВ до бенз(а)пірену та підтверджено, що бенз(а)пірен є маркером щодо кількісного вмісту суми ПАВ (рис. 7).

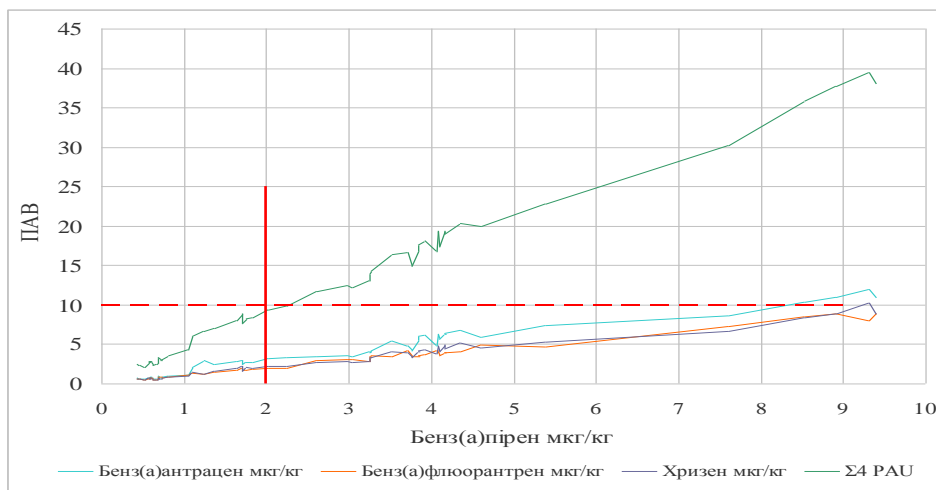


Рисунок 7 – Залежність ПАВ від концентрації бенз(а)пірену

З рис. 7 очевидно, що зазначені вище допустимі норми Комісії ЄС відносно бенз[а]пірену (2 мкг/кг) та суми ПАВ (10 мкг/кг) добре корелюються.

За допомогою удосконаленого методу, гармонізованого з міжнародним стандартом, досліджено більше 1000 зразків олії та насіння. В результаті досліджень встановлено, що вміст бенз(а)пірену в олії соняшниковій рафінованій дезодорованій знаходиться в межах від 0,1 до 8,0 мкг/кг, в нерафінованій та насінні соняшнику – 0,9–15,0 мкг/кг, а в поодиноких випадках досягає величини у 100 мкг/кг.

Для оцінки точності отриманих результатів нами використано проби з добавками та внутрішньолабораторні контрольні зразки з відомою масовою часткою бенз[а]пірену на рівні максимально допустимих. Нами вибрано зразок із вмістом бенз[а]пірену 2,7 мкг/кг результати досліджень наведено на рис. 8.

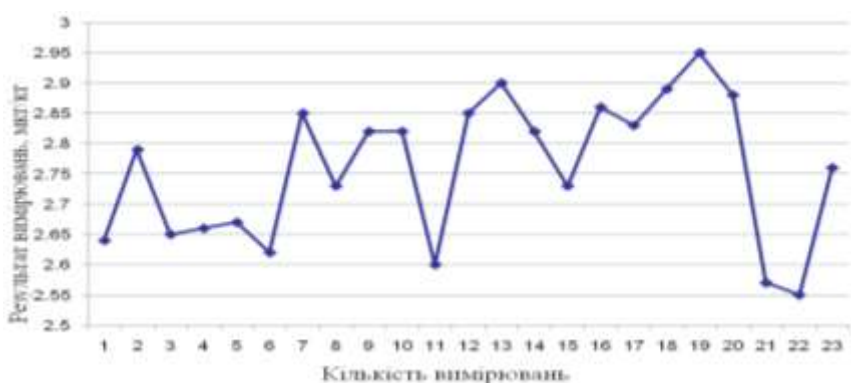


Рисунок 8 – Результати досліджень контрольного зразка олії соняшникової за допомогою аналізатора Agilent 1200

У результаті проведених 23 досліджень внутрішньо-лабораторного контрольного зразка визначено відносне середньоквадратичне відхилення (СКВ) 4,2 %. Отриманий результат свідчить про те, що відтворюваність результатів досліджень, отриманих за

допомогою донорно-акцепторної хроматографії, порівняно з іншими методами, дозволяє зменшити похибку вимірювань більше ніж у десять разів.

Було проведено дослідження наявності поліароматичних вуглеводнів у олії соняшниковій нерафінованій, результати наведено на рис. 9. Встановлено кількісну наявність ПАВ: антрацен – 12,3 мкг/кг, хризен – 10,4 мкг/кг, флуорантен – 9,44 мкг/кг, бенз(а)пірен – 9,74 мкг/кг. Сумма ПАВ у представленому зразку склала 41,88 мкг/кг.

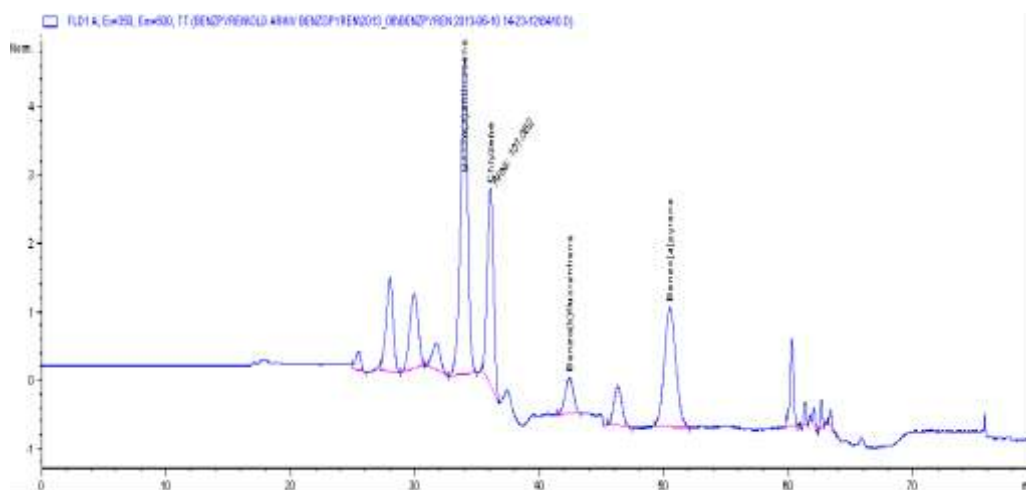


Рисунок 9 – Хроматограма олії нерафінованої з вмістом ПАВ

Вище представлений метод дозволяє звільнитись від складної підготовки зразків до досліджень та уникнути втрати ПАВ у порівнянні з іншими хроматографічними методами, які потребують специфічних реагентів тривалої підготовки проби, дотримання певних умов під час проведення дослідження.

Отримані дані підтверджують основні шляхи потрапляння канцерогенних ПАВ в насіння соняшника, рослинну олію та в харчові продукти через асфальтове покриття підлоги, використанні не якісного палива, вирощування соняшника вздовж доріг. Тому є гостра необхідність вивчення впливу технологій вирощування, сушки, підсушування та переробки насіння соняшника з метою виявлення критичних точок, що надасть можливість зменшити вміст бенз[а]пірену в рослинних оліях та олієжировмісних продуктах.

Висновки

Встановлено, що використання аналізатора Agilent 1200 за допомогою донорно-акцепторної хроматографії збільшує точність та достовірність отриманих результатів досліджень.

В результаті аналізу проведеної валідації щодо інструментальних методів та методик контролю бенз[а]пірену в технології олієжирової сировини, рослинних олій, олієжирових і олієжировмісних продуктів виявлено потребу в наявності ефективних і точних методів визначення вмісту ПАВ в рослинних оліях та олієжировмісних продуктах.

Література

1. New EU rules on PAH levels in food, mainly on benzo(a)pyrene: IP/04/1211. – Brussels, 2004. – 1 p.
2. Lacoste F. Undesirable Compounds And Contaminants In Fats And Oils In Fats

And Oils Processing And Utilization / F. Lacoste // French Institute for Fats and Oils PESSAC: France AOCS / IUPAC Workshop, 6–8 December 2004. – Tunis, 2004. – P. 2.

3. Dennis M.J. Factors affecting the polycyclic aromatic hydrocarbon content of cereals, fats and other food products / M. J. Dennis, R. C.Massey, G. Cripps [et al.] // Food Addit. Contam. – 1991. – Vol. 8. – P. 517–530.

4. Григоренко Л.Т. Исследование загрязнения пищевых растительных масел 3,4 бензпиреном и изыскание путей выведения из них: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Химия» / Л.Т. Григоренко. – Л., 1973. – 20 с.

5. Setting maximum levels contaminants in food staffs: Commission Regulation (EC) No 466/2001. – [of 8 March 2001]. – OJ L 77, 16.3.2001. – P. 109.

6. К вопросу о регламентации содержания 3,4-бензпирена в растительном масле и жирах / В. Голодняк, Н. Граница, Л. Григорова [и др.] // Збірник праць УкрНДІОЖ УААН. –2007. – Випуск 1. – С. 107.

7. О проблеме содержание 3,4 бензпирена в растительном масле и жирах / В. Голодняк, Н. Граница, Л. Григорова [и др.] // Олійно–жировий комплекс.– 2007.– № 3.– С. 55.

8. Продукти харчові. Методи визначення масової частки бенз[а]пірену : ДСТУ 4689:2006. – [Чинний від 2006–01–01].– К. : Держспоживстандарт України, 2006.– 231 с. – (Національний стандарт України).

9. ISO 22959:2009 Animal and vegetable fats and oils – Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by on-line donor-acceptor complex chromatography and HPLC with fluorescence detection, 2009, 22 p.

10. Левчук І.В. Аспекти моніторингу олії та насіння соняшнику / І. Левчук, В. Кіщенко, М. Осейко // Збірник наукових праць Харківського державного університету харчування та торгівлі.– Харків: ХДУХТ.– 2011.– Вип. 2 (14).– С. 315–321.

11. Левчук І.В. Determination of benzo[a] pyrene in sunflower seeds, edible oils and derived products manufactured in Ukraine by liquid chromatography using fluorescence detector and gas chromatography using mass selective detector/ І. Левчук, В. Кіщенко, О. Голубець // Журнал Хроматографічного товариства.– К. – 2011.– Т. XI.– № 1–2. – С. 5–11.

12. Левчук І.В. The Benz(a)pyrene monitoring in sunflower seeds as the way to cancerogenic safety of food oil and fat containing / І. Левчук, В. Кіщенко, М. Осейко // Журнал Хроматографічного товариства. – К. – 2012. – Т. XII. –№ 1–4. – С. 13–20.

Bibliography (transliterated)

1. New EU rules on PAH levels in food, mainly on benzo(a)pyrene: IP/04/1211. – Brussels, 2004. – 1 p.

2. Lacoste F. Undesirable Compounds And Contaminants In Fats And Oils In Fats And Oils Processing And Utilization / F. Lacoste // French Institute for Fats and Oils PESSAC: France AOCS / IUPAC Workshop, 6–8 December 2004. – Tunis, 2004. – P. 2.

3. Dennis M.J. Factors affecting the polycyclic aromatic hydrocarbon content of cereals, fats and other food products / M. J. Dennis, R. C.Massey, G. Cripps [et al.] // Food Addit. Contam. – 1991. – Vol. 8. – P. 517–530.

4. Grigorenko L.T. Issledovanie zagryazneniya pischevyih rastitelnyih masel 3,4 benzpirenom i izyiskanie putey vyvedeniya iz nih: avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk : spets. 05.02.08 «Химия» / L.T. Grigorenko. – L., 1973. – 20 p.

5. Setting maximum levels contaminants in food staffs: Commission Regulation (EC) No 466/2001. – [of 8 March 2001]. – OJ L 77, 16.3.2001. – P. 109.

6. К вопросу о регламентации содержания 3,4-бензпирена в растительном масле и жирах / V. Golodnyak, N. Granitsa, L. Grigorova [i dr.] // Zbirnik prats UkrNDIOZh UAAN. –2007. – Vyipusk 1. – P. 107.
7. O probleme sodержanie 3,4 benzpirena v rastitelnom masle i zhirah / V. Golodnyak, N. Granitsa, L. Grigorova [i dr.] // Oliyno–zhiroviy kompleks. – 2007. – # 3. – P. 55.
8. Produkty harchovi. Metodi viznachennya masovoyi chastki benz[a]pirenu : DSTU 4689:2006. – [Chinniy vid 2006–01–01].– K. : Derzhspozhivstandart Ukrayini, 2006.– 231 p. – (Natsionalniy standart Ukrayini).
9. ISO 22959:2009 Animal and vegetable fats and oils – Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by on-line donor-acceptor complex chromatography and HPLC with fluorescence detection, 2009, 22 p.
10. Levchuk I.V. Aspekti monitoringu oliyi ta naslnnya sonyashniku / I. Levchuk, V. KIschenko, M. Oseyko // Zbirnik naukovih prats Harkivskogo derzhavnogo universitetu harchuvannya ta torgivli. – Harkiv: HDUHT. – 2011. – Vip. 2 (14). – P. 315–321.
11. Levchuk I.V. Determination of benzo[a] pyrene in sunflower seeds, edible oils and derived products manufactured in Ukraine by liquid chromatography using fluorescence detector and gas chromatography using mass selective detector/ I. Levchuk, V. KIschenko, O. Golubets // Zhurnal Hromatografichnogo tovaristva. – K. – 2011. – T. III. – # 1–2. – P. 5–11.
12. Levchuk I.V. The Benz(a)pyrene monitoring in sunflower seeds as the way to cancerogenic safety of food oil and fat containing / I. Levchuk, V. KIschenko, M. Oseyko // Zhurnal Hromatografichnogo tovaristva. – K. – 2012. – T. III. – # 1–4. – P. 13–20.

УДК 664:665.1/7:539:542/543

Левчук И.В., Кищенко В.А., Тимченко В.К., Куница Е.В.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕНЗ[А]ПИРЕНА И СУММЫ ПАУ В РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЛАХ

В статье представлено определение бенз[а]пирена и других полициклических ароматических углеводородов на основе высокоэффективного жидкостного анализатора Agilent 1200. Описан принцип определения полициклических ароматических углеводородов в маслах и масложиродержащих продуктах при помощи on-line донорно-акцепторной комплексной хроматографии и высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуорисцентным детектированием на анализаторе Agilent 1200 в сравнении с анализатором согласно ISO 22959.

Levchuk I., KIschenko V., Timchenko V., Kunitsa K.

IMPROVEMENT IN DETERMINATION OF BENZO[A]PYRENE AND SUM OF PAHS IN VEGETABLE OILS

The article presents a definition of benzo[a]pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons based on high performance liquid analyzer Agilent 1200. The principle of determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the oils and products containing oil using the on-line donor-acceptor complex chromatography and high performance liquid chromatography with fluorescent detection Agilent 1200 analyzer versus analyzer according to ISO 22959.

Бухкало С.И., Иглин С.П.

ДЕЯКІ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ХІМІЧНИХ ЗМІН ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ

Визначення загальних характеристик методів дослідження

Найбільш інформативними за нашими дослідженнями експлуатації полімерних виробів для визначення зміни концентрації функціональних груп, наприклад для поліолефінів, є метод ІЧ-спектроскопії [1–3] за величиною оптичної щільності в області характеристичних частот (ступеня ненасиченості та наявності киснеутримуючих груп), або модифіковані методи хімічного аналізу. При постановці та теоретичному обґрунтуванні задач дослідження, виділення предметних областей і перевірки адекватності моделей використано загальну теорію систем, зокрема розглянуті питання дослідженні хіміко-технологічних задач, коли є апріорні відомості про поведінку досліджуваної величини, які диктують конкретний вид теоретичної залежності.

Теорія та розрахунки експериментальних досліджень. Дослідження даних у першій групі за перший період експлуатації полімерної плівки, (рис. 1) проводили для трьох моделей: лінійна, квадратична та експоненційна.

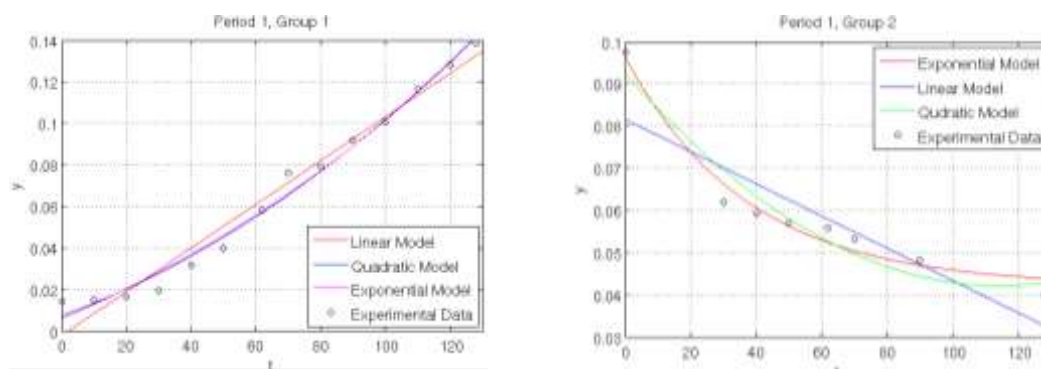


Рисунок 1 – Теоретичні криві та експериментальні точки у групі 1 та 2 (Group 1 та 2) за перший період (Period 1) експлуатації полімерної плівки

Модель 1. Розглянемо лінійну модель: $y = b_1 + b_2 t$, (1); стандартна процедура МНК дає таку найкращу модель: $y = 0,002366184 + 0,001053546 t$ (рис. 1). Довірні інтервали для параметрів моделі з довірною ймовірністю 95% представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри лінійної моделі (1) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	$-2,366184 \cdot 10^{-3}$	$-1,097310 \cdot 10^{-2}$	$6,240729 \cdot 10^{-3}$
b_2	$1,053546 \cdot 10^{-3}$	$9,408281 \cdot 10^{-4}$	$1,166263 \cdot 10^{-3}$

Швидкість зростання функції $y = f(t)$ у цій моделі є сталою: $v_{\max} = b_2 = 0,001053546$ (3). Мінімальне значення функції правдоподібності (4) для цієї моделі та вибіркова дисперсія будь-якої моделі обчислюється за формулою (5):

$$L_{\min} = \sum_{i=1}^n (y_i - f(t_i))^2 = 7,219096 \times 10^{-4} \quad (4), \quad D = L_{\min} / (n - k), \quad (5)$$

де n – кількість експериментальних точок; k – кількість параметрів моделі.

Для моделі (1) вибіркова дисперсія $D_1 = 6,015913 \cdot 10^{-5}$.

Модель 2. Квадратична модель має вигляд: $y = b_1 + b_2 t + b_3 t^2$ (6), МНК дає таку найкращу квадратичну модель (рис. 1):

$$y = -0,007245906 + 0,0005673633t + 3,771459 \times 10^{-6} t^2. \quad (7)$$

Довірні інтервали для параметрів моделі з довірною ймовірністю 95 % наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри квадратичної моделі (6) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	$-7,245906 \times 10^{-3}$	$-1,154928 \times 10^{-2}$	$1,564674 \times 10^{-2}$
b_2	$5,673633 \times 10^{-4}$	$2,643432 \times 10^{-4}$	$8,703835 \times 10^{-4}$
b_3	$3,771459 \times 10^{-6}$	$1,503924 \times 10^{-6}$	$6,038995 \times 10^{-6}$

Найбільша швидкість зростання функції $y = f(t)$ у цій моделі досягається на правому кінці, при $t = t_{\max} = 128$. Вона дорівнює: $v_{\max} = b_2 + 2b_3 t_{\max} = 0,001532857$ (8). Мінімальне значення функції правдоподібності для цієї моделі $L_{\min} = 3,254346 \times 10^{-4}$. Дисперсія (5): $D_2 = 2,958496 \times 10^{-5}$.

Модель 3 – експоненційна: $y = b_1 e^{b_2 t} + b_3$ (9). На відміну від попередніх моделей, ця функція є нелінійною відносно параметрів моделі b_1, b_2, b_3 , тому для мінімізації функції правдоподібності $L(b_1, b_2, b_3)$ (суми квадратів відхилень експериментальних значень y_i від теоретичних $f(t_i)$) використовуються прямі методи на кшталт [6]. Результат розв’язання задачі МНК: $y = 0,104963 e^{0,006483462t} - 0,09930286$ (10). Довірні інтервали для параметрів моделі (9) з довірною ймовірністю 95% наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри експоненційної моделі (9) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	$1,04963 \times 10^{-1}$	$-5,312402 \times 10^{-3}$	$2,152384 \times 10^{-1}$
b_2	$6,483462 \times 10^{-3}$	$1,862752 \times 10^{-3}$	$1,110417 \times 10^{-2}$
b_3	$-9,930286 \times 10^{-2}$	$-2,15894 \times 10^{-1}$	$1,728829 \times 10^{-2}$

Як і у квадратичній моделі, найбільша швидкість зростання функції $y = f(t)$ у цій моделі досягається на правому кінці, при $t = t_{\max} = 128$. Вона дорівнює: $v_{\max} = b_1 b_2 e^{b_2 t_{\max}} = 0,001560475$ (11). Мінімальне значення функції правдоподібності для цієї моделі $L_{\min} = 3,254346 \times 10^{-4}$. Дисперсія (5): $D_3 = 2,958496 \times 10^{-5}$. Дисперсії моделей 2 та 3 вдвічі менші за дисперсію лінійної моделі 1, але з точки зору математичної

статистики таке зменшення є незначним, тому що квантиль (критичне значення) F -розподілу Фішера на рівні 95%-ної довірної ймовірності для 12 та 11 ступенів волі $F_{0,95}(12, 11) = 2,7876$. Значним (суттєвим) було б зменшення вибіркової дисперсії у 2,7876 або більше разів. Кількість ступенів волі – це знаменник вибіркової дисперсії (5). У нас є $n = 14$ експериментальних точок, $k = 2$ параметри у лінійної моделі та $k = 3$ у квадратичної та експоненційної.

Для експериментальних даних другої групи першого періоду теоретичні міркування підказують, що кількість груп спадає з часом за експоненційним законом до якогось сталого мінімального рівня: $y = b_1 \cdot e^{-b_2 t} + b_3$ (12), де b_3 – мінімальний сталий рівень; b_2 – параметр швидкості спадання; b_1 – перевищення початкового рівня над сталим мінімальним. За допомогою МНК були знайдені найкращі оцінки параметрів b_1 , b_2 , b_3 та довірні інтервали для них з довірною ймовірністю 95%. Вони наведені в таблиці 4. Найкраща (за МНК) експоненційна модель є такою: $y_{\text{exp}} = 0,054175 \cdot e^{-0,026848t} + 0,042131$ (13).

Таблиця 4 – Параметри експоненційної моделі (12) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	0,054175	0,042118	0,066232
b_2	0,026848	0,013062	0,040635
b_3	0,042131	0,032339	0,051924

Найбільша за модулем швидкість змінювання функції (13) – у початковий момент часу, при $t = 0$; вона дорівнює: $v_{\text{max}} = b_1 b_2 = 0,001455$ (14). Вибіркова дисперсія для моделі (12) $D = 1,178877 \cdot 10^{-5}$. Для порівняння разом з експоненційною моделлю (12) були розглянуті також лінійна: $y = b_1 + b_2 t$ (15) та квадратична $y = b_1 + b_2 t + b_3 t^2$ (16) моделі. Параметри цих моделей та довірні інтервали для них з довірною ймовірністю 95% – у таблицях 5 та 6. Найбільша за модулем швидкість змінювання функції в цих моделях дорівнює модулю коефіцієнта b_2 . Аналітичні вирази для найкращих моделей:

$$y_{\text{lin}} = 0,0816 - 0,000382t; y_{\text{quad}} = 0,092557 - 0,00088175t + 3,8497 \times 10^{-6}t^2. \quad (17)$$

Таблиця 5 – Параметри лінійної моделі (15) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	0,081602	0,067301	0,095904
b_2	-0,000382	-0,000589	-0,000175

Вибіркова дисперсія для лінійної моделі дорівнює $7,589072 \times 10^{-5}$, а для квадратичної $9,106886 \times 10^{-5}$. Це значно гірше, ніж для експоненційної моделі (12). Наскільки саме гірше – показує порівняння моделей за F -критерієм Фішера. Порівнюємо лінійну модель з експоненційною: $\frac{D_{\text{lin}}}{D_{\text{exp}}} = 6,4375 > F_{0,95}(6, 5) = 4,9503$ (18). Відношення вибірових дисперсій перевищує критичне значення F -розподілу Фішера, тому можна вважати, що лінійна модель є гіршою за експоненційну з довірною ймовірністю 95 %. Числа 6 та 5 у

формулі (18) – це кількість ступенів волі вибірових дисперсій, які дорівнюють кількості експериментальних точок 8 мінус кількість параметрів моделі (2 або 3).

Таблиця 6 – Параметри квадратичної моделі (16) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	0,092557	0,079947	0,105167
b_2	$-8,8175 \times 10^{-4}$	-0,001295	$-4,6888 \times 10^{-4}$
b_3	$3,8497 \times 10^{-6}$	$8,401 \times 10^{-7}$	$6,8594 \times 10^{-6}$

Такий самий результат дає порівняння квадратичної моделі з експоненційною: $\frac{D_{quad}}{D_{exp}} = 7,7251 > F_{0,95}(5, 5) = 5,0503$ (19). Таким чином, серед трьох розглянутих моделей експоненційна є найкращою. На рис. 1 показані теоретичні криві для всіх трьох моделей та експериментальні точки.

Експериментальні дані у 3-й групі за 1-й період показані на рис. 2. Вони мають вигляд S-подібної кривої. Теорія каже, що теоретична крива $y = f(t)$ при $t = 0$ має якийсь невідомий ненульовий рівень y_{min} , потім зростає все швидше й швидше до якогось невідомого значення аргумента t_0 . Далі її зростання уповільнюється, і при $t = 128$ вона виходить на максимально можливий рівень y_{max} , теж невідомий. При цьому функція $y = f(t)$ є непервною та гладкою.

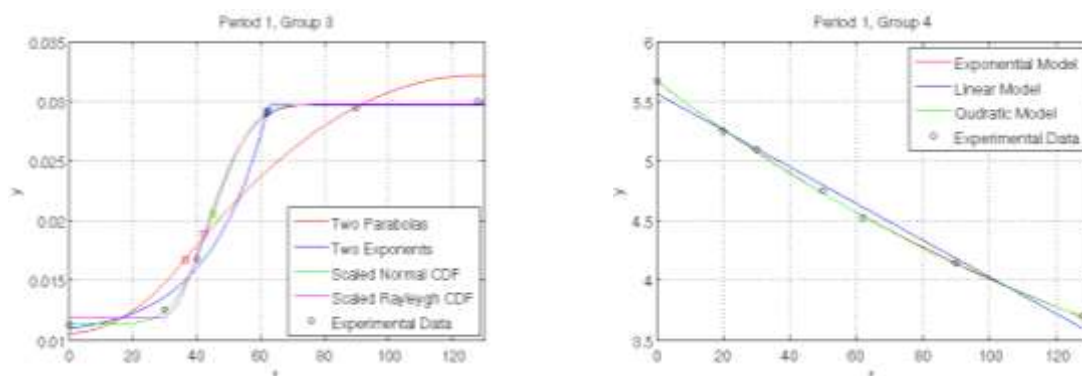


Рисунок 2 – Теоретичні криві та експериментальні точки у групі 3 та 4 (Group 3 та 4) за перший період (Period 1) експлуатації полімерної плівки

Теоретичні криві зазначені на рис. 2 для всіх чотирьох моделей Group 3, експериментальні точки для них зазначені кружками; квадратики – це ті точки, де досягається найбільша швидкість змінювання функції $y = f(t)$. Найкраще підходять масштабовані функції нормального та Релеєвого розподілу. Експериментальні дані Group 4 (рис. 3) зазначені, як і для 2-ї групи за 1-й період, перевірялися три моделі: експоненційна (12), лінійна (15) та квадратична (16). Найкраща експоненційна модель: $y_{exp} = 3,901085 \cdot e^{-0,005523893t} + 1,770948$. (37) Її параметри та довірні інтервали для них:

Найбільша за модулем швидкість змінювання функції (37) – у початковий момент часу, при $t = 0$; вона дорівнює: $v_{max} = b_1 b_2 = 0,02154918$ (38). Вибіркова дисперсія для моделі (37) $D = 3,016906 \times 10^{-4}$. Аналітичні вирази для найкращих лінійної та квадратичної моделей: $y_{lin} = 5,565279 - 0,01535515t$; $y_{quad} = 5,6677 - 0,02085172t + 4,269654 \times 10^{-5}t^2$. Най-

більша за модулем швидкість змінювання функції в цих моделях дорівнює модулю коефіцієнта b_2 :

Таблиця 7 – Параметри експоненційної моделі (12–37) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	3.901085	3.168406	4.633764
b_2	0.005524	0.004037	0.00701
b_3	1.770948	1.015032	2.526864

Таблиця 8 – Параметри лінійної моделі (39) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	56565279	5,431504	5,699055
b_2	-0,01535515	-0,01732977	-0,01338052

Таблиця 9 – Параметри квадратичної моделі (39) та довірні інтервали для них

параметр	значення	нижня границя	верхня границя
b_1	5,6677	5,628566	5,706834
b_2	$-2,085172 \times 10^{-2}$	$-2,231688 \times 10^{-2}$	$-1,938657 \times 10^{-2}$
b_3	$4,269654 \times 10^{-5}$	$3,181771 \times 10^{-5}$	$5,357537 \times 10^{-5}$

Вибіркова дисперсія для лінійної моделі дорівнює $6,785515 \times 10^{-3}$, а для квадратичної $2,764169 \times 10^{-4}$. Лінійна модель є значно гіршою за квадратичну та експоненційну. Наскільки саме гірше – показує порівняння моделей за F -критерієм Фішера. Порівнюємо лінійну модель з експоненційною: $\frac{D_{\text{lin}}}{D_{\text{exp}}} = 22,4916 > F_{0,95}(5, 4) = 6,2561$ (40). Відношення

вибіркових дисперсій перевищує критичне значення F -розподілу Фішера, тому можна вважати, що лінійна модель є гіршою за експоненційну з довірною ймовірністю 95%. Числа 5 та 4 у формулі (40) – це кількості ступенів волі вибірових дисперсій, які дорівнюють кількості експериментальних точок 7 мінус кількість параметрів моделі (2 або 3). Розбіжність лінійної моделі з квадратичною є ще суттєвішою. Експоненційна та квадратична криві майже зливаються і є найкращими.

Висновки. Таким чином, серед трьох розглянутих експериментальних результатів зміни ненасичених груп у поліетиленовій плівці при її експлуатації отримані моделі серед яких, наприклад, дані для експоненційної та квадратичної Gr. 4 є найкращими. Перспективи подальшого розвитку досліджень зв'язані з поширенням обсягу функціональних груп залежно від умов експлуатації та способів переробки твердих побутових відходів.

Література

1. Бухкало С.И. Изменение свойств в процессе эксплуатации пленки и направления модификация вторичного полиэтилена: дис. канд. техн. наук : 25.01.88 / Бухкало Светлана Ивановна. – М., 1988. – 150 с.

2. Бухкало С.І. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи) [текст] підручник. Київ «Центр учбової літератури»: 2014, 456 с.

3. Бухкало С.И. Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов / Интегрированные технологии та енергозбереження // 2001. – № 2. – С. 106–112.

Bibliography (transliterated)

1. Buhkalo S.I. Izmenenie svoystv v protsesse ekspluatatsii plenki i napravleniya modifikatsiya vtorichnogo polietilena: dis. kand. tehn. nauk : 25.01.88 / Buhkalo Svetlana Ivanovna. – M., 1988. – 150 p.

2. Buhkalo S.I. Zagalna tehnologiya harchovoyi promislovosti u prikladah i zadachah (Innovatsiyni zahodi) [tekst] pldruchnik. KiYiv «Tsentr uchbovoyi lteraturi»: 2014, 456 p.

3. Buhkalo S.I. Resursosberegayuschie tehnologii ispolzovaniya polimernyih othodov / Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya // 2001. – # 2. – P. 106–112.

УДК 678.742

Бухкало С.И., Іглин С.П.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Применение методов математического моделирования при исследовании структурно-химических изменений в процесс эксплуатации полимерных изделий в зависимости от температурно-временных режимов и регионов позволит прогнозировать их устойчивую работу в заданных условиях. Показаны возможности решения этих задач с применением методов математического моделирования для процессов эксплуатации полиэтиленовой пленки с учетом изменения физико-химических, химических и структурно-механических характеристик полимерных материалов при эксплуатации.

Bukhkalov S.I., Iglin S.P.

SOME MODELS RESEARCHES STRUCTURAL AND CHEMICAL CHANGES FOR POLYMERS

The research of environmental safety and solving the problems of chemical technological problems of scientifically grounded integrated processes of different originated polymer wastes and their life cycle are discussed. The possibilities of these problems solution were shown with use of processes simulation with taking into account the changes of physical-chemical, molecular, chemical and mechanical characteristics of polymer materials during exploitation. The goal is the selection of the environmentally safe energy- and resource saving methods of polymer production of new nomenclature from secondary polymer raw materials and development of effective equipment for processes.

ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ НИТРАТОВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМ ВЕЩЕСТВОМ

Поверхностная модификация полимерных материалов – широко применяемый технологический прием, позволяющий целенаправленно изменять их свойства. В общем случае он заключается в трансформации структуры или химического строения поверхности и прилегающих к ней слоев материала за счет физического или химического воздействия [1]. В применении к гранулированным нитратам целлюлозы, используемых в качестве пороха, это достигается путем насыщения поверхностных слоев гранул веществами, снижающими скорость горения (флегматизация пороха) [2]. Такая модификация нитратцеллюлозных гранул позволяет задавать необходимый закон горения и тем самым обеспечивать требуемые баллистические характеристики. Вещества, используемые при модификации гранулированных нитратов целлюлозы, наряду со способностью снижать скорость горения, в указанном случае для создания устойчивой зоны насыщения должны обладать также способностью образовывать межмолекулярные связи с функциональными группами макромолекул полимера, то есть являться пластификаторами [3].

Несмотря на практическое применение модификации поверхности гранул нитратов целлюлозы пластификаторами, в технологическом аспекте этот процесс недостаточно изучен, что затрудняет обоснование режимов его проведения.

Цель данной работы – на основании экспериментальных исследований установить закономерности насыщения поверхностных слоев гранулированных нитратов целлюлозы пластифицирующим веществом.

В качестве пластифицирующего вещества в данных исследованиях использовали дибутилфталат. Он представляет собой хороший пластификатор нитратов целлюлозы и обладает достаточной способностью снижать скорость горения, что дает возможность применять его в качестве флегматизатора порохов [2]. Особенностью дибутилфталата является также его хорошая растворимость в органических растворителях и плохое смешивание с водой. Это позволяет модификацию гранулированных нитратов целлюлозы проводить двумя способами: водной эмульсией (эмульсионный способ) или раствором (жидкостный способ), которые применяются в производстве.

В обоих случаях процесс насыщения поверхностных слоев нитратцеллюлозных гранул таким пластификатором как дибутилфталат представляет собой суперпозицию капиллярного и сорбционного механизмов взаимодействия жидкой фазы с поверхностью гранулы. При капиллярном механизме происходит заполнение капилляров (пор, трещин и т.д.), выходящих на поверхность гранулы, с последующим отложением в них пластификатора. Очевидно, что при развитой капиллярно-пористой системе поверхностных слоев гранулы это отложение будет определять содержание пластификатора в них после насыщения.

Сорбционный механизм включает адсорбцию пластификатора поверхностью гранулы из контактирующей с ней жидкой фазы и его проникновение (диффузию) в полимерную (нитратцеллюлозную) матрицу гранулы. При наличии в поверхностном слое капиллярно-пористой системы сорбционная поверхность включает также поверхность капилляров и пор, сообщающихся с геометрической поверхностью гранулы. При

этом в формировании насыщенной зоны определенную роль играет растворитель, входящий в модифицирующий состав, если он взаимодействует с нитратом целлюлозы, но имеет меньшую с ним совместимость, чем основное пластифицирующее вещество. Его предварительное взаимодействие с нитратом целлюлозы способствует набуханию поверхностного слоя гранулы, что облегчает диффузию основного вещества. После завершения насыщения растворитель, как правило, удаляется [2].

Экспериментальное исследование модификации гранулированных нитратов целлюлозы дибутилфталатом проводили в лабораторном смесителе с рубашкой, через которую циркулировала вода, нагреваемая в жидкостном термостате. В этом смесителе готовили модифицирующие составы в виде раствора или водной эмульсии и обрабатывали ими гранулы.

При жидкостном способе модификации навеску гранул фракционного состава 0,315–0,4 мм – 25 %; 0,4–0,63 мм – 75 % и плотность $\rho_r=1300$ кг/м³ помещали в предварительно приготовленный раствор дибутилфталата в этиловом спирте с массовой долей – C_n и соотношении массы раствора к массе гранул 1:2. В проводимых опытах кроме начальной массовой доли дибутилфталата в растворе также варьировали такими параметрами процесса, как время насыщения – τ и температура – t . Диапазон изменения температуры ограничивался температурным режимом, применяемым на практике. После выдержки в растворе при заданных параметрах процесса насыщения в условиях периодического перемешивания гранулы отделяли от раствора и сушили. Высушенные гранулы использовали для микроскопического анализа, а отделенный раствор – для измерения концентрации оставшегося в нем дибутилфталата.

Модификация эмульсионным способом включала приготовления водной эмульсии дибутилфталата или его раствора в этилацетате и обработку нитратцеллюлозных гранул этой эмульсией. При приготовлении эмульсии в смеситель заливали воду с растворенным в ней эмульгатором – мездровым клеем (для повышения устойчивости эмульсии), содержание которого составляло 1 % (масс.) по отношению к воде. Затем добавляли дибутилфталат или его раствор, содержимое смесителя нагревали до заданной температуры и диспергировали в течение 30 мин при частоте вращения мешалки 400 об/мин. В образовавшуюся водную эмульсию загружали гранулы и перемешивали в условиях заданного температурно-временного режима. При использовании одного (100%-ного) дибутилфталата для повышения эффективности его проникновения в гранулы в дисперсионную среду эмульсии вводили определенное количество растворителя (этилацетата). По окончании процесса насыщения гранулы отделяли от эмульсии, промывали и сушили. В опытах варьировали те же параметры, что и в жидкостном способе, а также модуль эмульсии – μ_e (отношение массы эмульсии к массе дибутилфталата или его раствора), массовую долю этилацетата в воде – k (при использовании 100%-ного дибутилфталата).

Количество дибутилфталата в гранулах при жидкостном способе модификации рассчитывали по разности концентраций исходного раствора и раствора, полученного после отделения гранул, которые определяли газохроматографическим методом [4]. При эмульсионном способе насыщения содержание дибутилфталата в гранулах определяли путем омыления нитратцеллюлозной основы раствором щелочи. Щелочной раствор после разложения экстрагировали циклогексаном и с помощью газового хроматографа определяли концентрацию дибутилфталата. Затем рассчитывали его массу в растворе и соответственно в гранулах как

$$G = Vc ,$$

где V – объем раствора; c – концентрация дибутилфталата в растворе.

Результаты исследований представляли в виде зависимостей изменения относительного содержания дибутилфталата в гранулах

$$\bar{G} = G/M,$$

где G – масса дибутилфталата в гранулах, г; M – масса образца гранул (кинетические кривые насыщения), г.

На рисунке 1 представлены такие зависимости, полученные при жидкостном способе модификации при $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием растворов разной начальной концентрации.

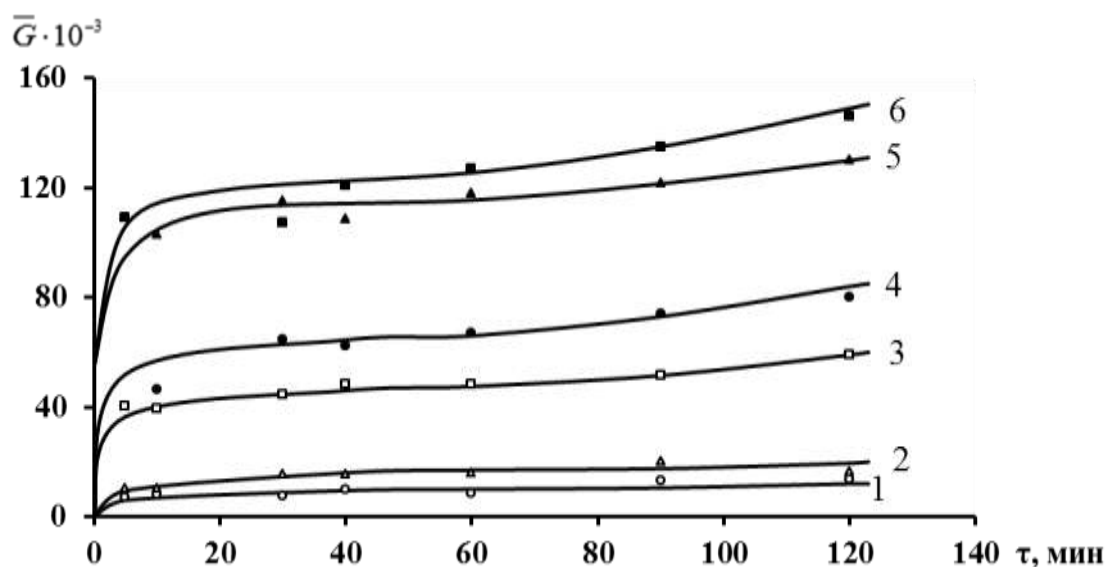


Рисунок 1 – Кинетические кривые насыщения нитратцеллюлозных гранул при разной массовой доле (C_n) дибутилфталата в растворе:
1 – 0%; 2 – 5%; 3 – 10%; 4 – 15%; 5 – 20%; 6 – 25%

Представленные зависимости характеризуются быстрым подъемом на начальном этапе насыщения с выходом на практически установившееся состояние и, при дальнейшем насыщении, вторым подъемом, который в большей степени проявляется при большом содержании дибутилфталата в растворе. Такой характер кинетических кривых позволяет предположить об аномальности (отклонений от закона Фика) взаимодействия дибутилфталата с нитратами целлюлозы, которую можно отнести к аномальности двустадийного типа [5].

На рисунке 2 показано влияние температуры процесса на кинетику насыщения гранулированных нитратов целлюлозы 100 %-ным дибутилфталатом, из которого следует, что на начальной стадии интенсивность насыщения возрастает с повышением температуры, но процесс устанавливается при дальнейшем насыщении примерно на одном равновесном значении содержания дибутилфталата в гранулах.

Микроскопический анализ гранул, обработанных раствором или эмульсией дибутилфталата, проводили с целью определения их физического состояния при модификации. Экспериментально была установлена возможность визуализации зоны насыщения за счет изменения ее оптических свойств при переходе нитратов целлюлозы из исходного стеклообразного в

высокоэластическое состояние в этой зоне. Такой переход фиксировали на срезах гранул с помощью оптического микроскопа. В данных исследованиях использовали микроскоп XSP-146TP (Китай) с цифровой видеокамерой DSM130.

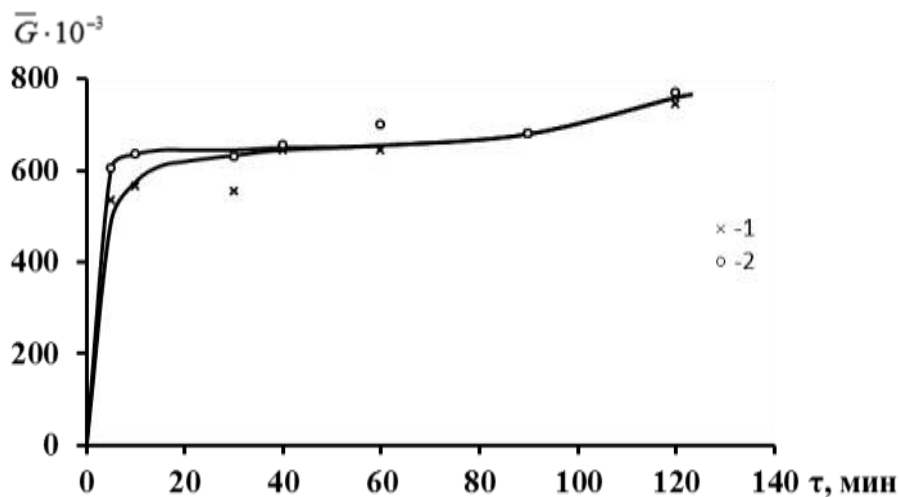


Рисунок 2 – Кинетические кривые насыщения нитратцеллюлозных гранул дибутилфталатом при разных температурах: 1 – $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 3 приведены микрофотографии срезов гранул, насыщенных дибутилфталатом жидкостным способом.

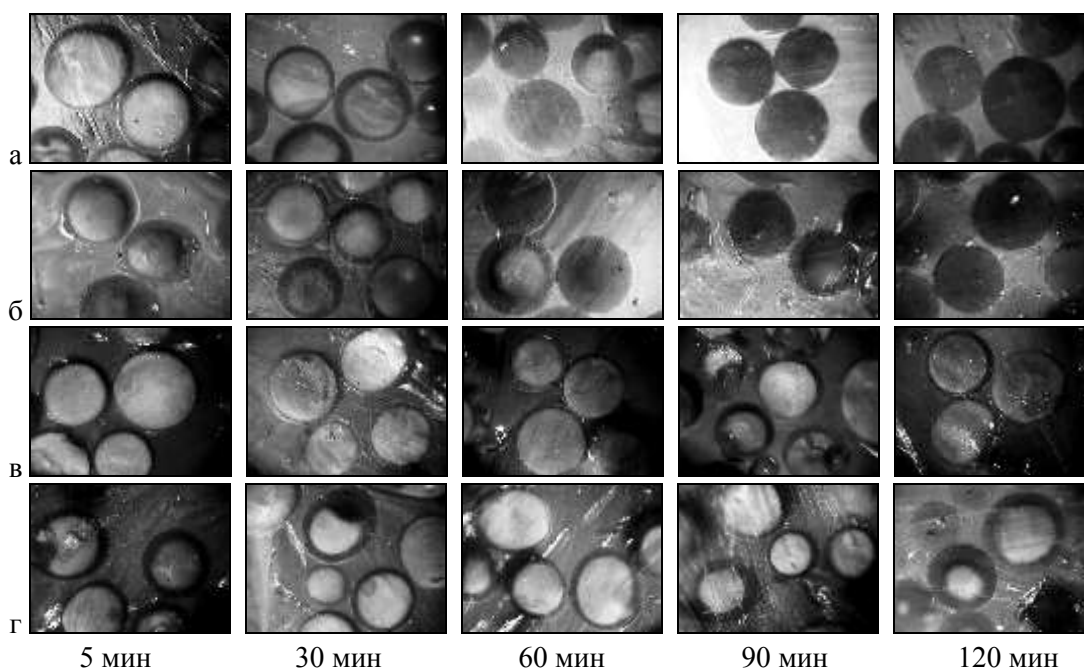


Рисунок 3 – Микрофотографии срезов гранул насыщенных дибутилфталатом жидкостным способом (увелич. $\times 20$):

а – $C_n=1\%$, $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – 25% , $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – 100% , $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; г – 100% , $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ физического состояния нитратцеллюлозных гранул при такой модификации по приведенным микрофотографиям показывает, что она происходит достаточно

интенсивно. Даже при использовании 1%-ного раствора дибутилфталата пластифицированная зона в гранулах образуется уже через 5 мин после начала насыщения (рис. 3а). При более длительном насыщении толщина этой зоны увеличивается, а через 60 мин появляются полностью пластифицированные гранулы. С увеличением времени насыщения до 90 мин и более количество таких гранул растет и в дальнейшем все гранулы становятся пластифицированными. Примерно этому времени соответствует подъем кинетических кривых после достижения равновесия, что более явно наблюдается при увеличении начальной массовой доли дибутилфталата в растворе (рис. 3а, 3б соответствуют рис. 1).

Следует также отметить, что использование дибутилфталата как индивидуального пластификатора (без растворителя) при температуре $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не приводит к пластификации полимерной основы гранул (рис. 3в), небольшая пластифицированная зона появляется при температуре $t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3г). Это свидетельствует о более высоком пластифицирующем действии составов, включающих растворитель как компонент, по сравнению с индивидуальными пластификаторами.

Сопоставление кинетической кривой насыщения нитратцеллюлозных гранул при использовании его 10%-ного раствора дибутилфталата в этиловом спирте с аналогичной кривой, полученной эмульсионным способом (10%-ный раствор дибутилфталата в этилацетате, эмульгированный в воде при $\mu_3=20$), в одинаковых температурных условиях ($t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$) показало, что эти зависимости качественно имеют одинаковый характер (рис. 4).

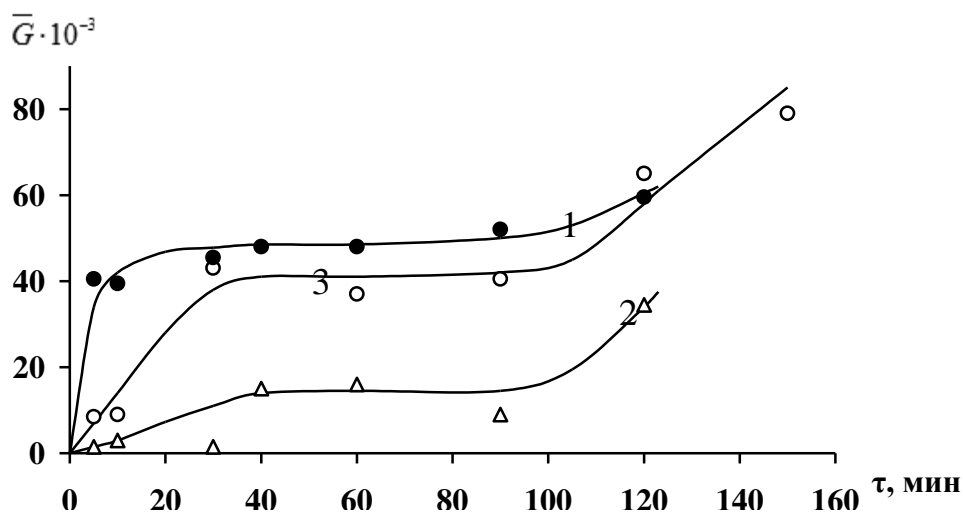


Рисунок 4 – Кинетические кривые насыщения нитратцеллюлозных гранул дибутилфталатом, полученные при жидкостном и эмульсионном способах:

- 1 – обработка гранул 10 %-ным раствором дибутилфталата в этиловом спирте;
- 2 – обработка водной эмульсией 10 %-ного раствора дибутилфталата в этилацетате при $\mu_3=20$;
- 3 – тоже при $\mu_3=40$

Из этого сопоставления следует, что кривые, полученные как жидкостным способом, так и эмульсионным относятся к двухстадийному типу. Отличие заключается в скорости достижения равновесия: для жидкостного способа характерна большая скорость насыщения, чем для эмульсионного. Это можно объяснить тем, что при эмульсионном способе поверхность гранул смочена водой, которая в определенной степени препятствует сорбции дибутилфталата. Следует также учитывать, что при эмульсион-

ном способе модифікації використовується во много раз менше розчину (в даному випадку в 20 раз по масі), ніж при жидкостному способі, з близьким кількісним результатом. С підвищенням модуля емульсії інтенсивність насичення і рівноважне вміст дібутилфталату в гранулах зменшуються (крива 3 на рис. 4).

Сопоставление кинетических кривых, полученных емульсионным насыщением нитратцеллюлозных гранул 10 %-ным раствором дибутилфталата в этилацетате и 100 %-ным дибутилфталатом, при содержании в дисперсионной среде 10 (масс.%) этилацетата, а также при введении этого количества (по абсолютной величине) в дибутилфталат, показано на рисунке 5.

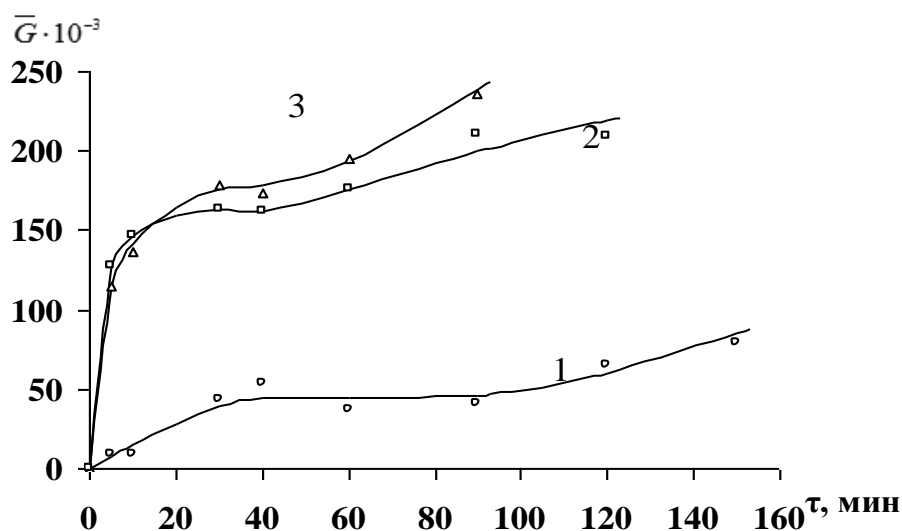


Рисунок 5 – Кинетические кривые, полученные при разных условиях емульсионного насыщения нитратцеллюлозных гранул дибутилфталатом:

- 1 – емульсия 10 %-ного раствора дибутилфталата в этилацетате;
- 2 – емульсия 100 %-ного дибутилфталата с 10 масс. % этилацетата в дисперсионной среде;
- 3 – емульсия дибутилфталата, содержащая тоже количество этилацетата, что и в дисперсионной среде, использованная при получении кривой 2

Из этого сопоставления следует, что интенсивность емульсионного насыщения значительно возрастает с увеличением содержания дибутилфталата в растворе (кривые 1 и 2).

Кинетические кривые, полученные при введении одного и того же количества растворителя в дисперсионную среду и непосредственно в дибутилфталат (кривые 2 и 3) почти совпадают. Из этого следует, что в данном случае этилацетат является компонентом модифицирующего состава, независимо от того куда он вводится – в дисперсионную среду или непосредственно в пластифицирующее вещество.

Результаты микроскопического анализа срезов нитратцеллюлозных гранул, насыщенных дибутилфталатом емульсионным способом (при $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\mu_3=20$) приведены на рисунке 6.

Представленные микрофотографии показывают, что при емульсионном способе, как и при жидкостном способе, скорость насыщения достаточно высокая, также уже через 5 мин обработки гранул в них появляется устойчивая пластифицированная зона, которая при дальнейшем насыщении растет и к 120 мин гранулы полностью расстекловываются (рис. 6а). При использовании только одного (100 %-ного) дибутилфталата процесс насыщения характеризуется очень малой интенсивностью, о чем свидетельствует отсутствие в этом случае пластифицированной зоны в гранулах (рис. 6б – 1).

Введение же в дисперсионную среду эмульсии этилацетата резко повышает скорость процесса насыщения, уже при его массовой доле в дисперсионной среде $k=5\%$ (рис. 6б – 3) появляется пластифицированная зона, а при массовой доле $k=10\%$ (рис. 6б – 4) гранулы полностью расстеклованы, т.е. этилацетат в данном случае играет роль компонента модифицирующего состава.

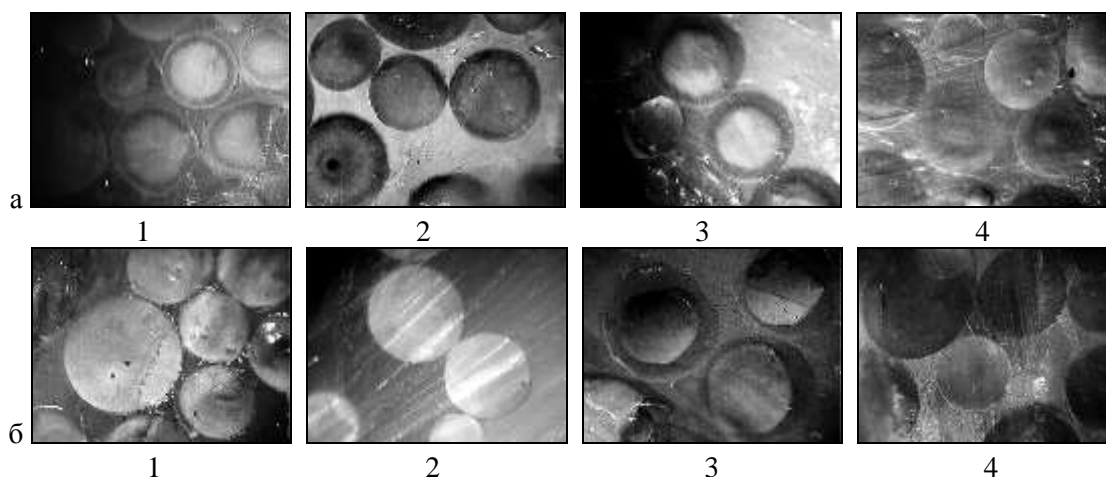


Рисунок 6 – Микрофотографии срезов гранул, насыщенных дибутилфталатом эмульсионным способом:

а – насыщение из эмульсии 10 %-ного раствора при разном времени обработки:

1 – $\tau=5$ мин; 2 – 10 мин; 3 – 40 мин; 4 – 120 мин

б - насыщение из эмульсии 100%-ного дибутилфталата при разном содержании этилацетата в дисперсионной среде:

1 – $k=0\%$; 2 – 1%; 3 – 5%; 4 – 10%

Таким образом, характер взаимодействия нитратцеллюлозных гранул с модифицирующим составом при эмульсионном способе такой же, как и при жидкостном способе. Это указывает на один и тот же механизм процесса насыщения гранул пластифицирующим веществом независимо от способа модификации.

Результаты экспериментальных исследований были обобщены эмпирическим уравнением

$$\bar{G} = B\tau^\gamma,$$

где коэффициент B и показатель степени γ определялись на основании экспериментальных данных.

Установлено, что при жидкостном способе модификации коэффициент B растет с увеличением начальной массовой доли дибутилфталата в растворе и температуры. Показатель степени γ с увеличением начальной массовой доли дибутилфталата растет до значения $C_n=15\%$, после чего остается постоянным. Температура процесса на показатель степени практически не влияет. Обработка экспериментальных данных позволила получить следующие зависимости

$$B = 0,015 \cdot 10^{-3} C_n^{1,07} t^{1,31};$$

Полученные зависимости применимы в пределах изменения начальной концентрации от 1% до 25% и температуры от 50°C до 80°C.

$$\gamma = 0,464e^{-0,116C_n}, \quad \text{при } C_n \leq 15 \%$$

$$\gamma = 0,079. \quad \text{при } 15 < C_n \leq 25 \%$$

В применении к эмульсионному способу рассматривался случай с 100 %-ного дибутилфталата с добавлением этилацетата в дисперсионную среду эмульсии. Экспериментальные данные показали, что коэффициент B в этом случае зависит от модуля эмульсии, содержания этилацетата в дисперсионной среде и температуры процесса. С увеличением массовой доли этилацетата в дисперсионной среде и температуры он растет, модуля эмульсии – уменьшается. Показатель степени γ растет с увеличением модуля эмульсии и уменьшением содержания этилацетата в дисперсионной среде. Влияние температуры на него находится в пределах погрешности опытов.

Для определения этих параметров предложены зависимости:

$$B = 0,144 \cdot k^{1,02} \cdot \mu_3^{-1,25} \cdot t^{0,21};$$

$$\gamma = 0,036 \cdot k^{-0,42} \cdot \mu_3^{0,75},$$

которые применимы в пределах изменения массовой доли этилацетата в дисперсионной среде от 1 % до 10 %, модуля эмульсии от 20 до 40, температуры от 50 °С до 80 °С.

Полученные эмпирические зависимости позволяют рассчитывать количество дибутилфталата, перешедшего в нитратцеллюлозные гранулы в течение заданного времени при обработке их жидкостным и эмульсионным способом в условиях соответствующих данному исследованию.

Литература

1. В.Г. Назаров. Поверхностная модификация полимеров: монография. / В.Г. Назаров. – М.: МГУП, 2008. – 474 с.
2. Михайлов Ю.М. Порох флегматизированный / Михайлов Ю.М. // Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. – М.: Янус-К, 2000. – С. 435.
3. Козлов П.В. Физико-химические основы пластификации полимеров. / П.В. Козлов, С.П. Папков. – М.: Химия, 1982. – 224 С.
4. Садовников А.М. Хроматографический метод определения динитротолуола, дибутилфталата и централита в баллистических порохах / А.М. Садовников, А.И. Волкова, М.П. Баранова, В.Е. Школьный // Вопросы специального машиностроения, серия II. – 1974. – Вып. 2 (2). – С. 45–49.
5. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы исследования / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых. – М.: Химия, 1979. – 301 с.

Bibliography (transliterated)

1. V.G. Nazarov. Poverhnostnaya modifikatsiya polimerov: monografiya. / V.G. Nazarov. – М.: MGUP, 2008. – 474 p.

2. Mihaylov Yu.M. Poroh flegmatizirovannyj / Mihaylov Yu.M. // Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkij entsiklopedicheskij slovar. – M.: Yanus-K, 2000. – P. 435.
3. Kozlov P.V. Fiziko-himicheskie osnovy plastifikatsii polimerov. / P.V. Kozlov, S.P. Papkov. – M.: Himiya, 1982. – 224 p.
4. Sadovnikov A.M. Hromatograficheskiy metod opredeleniya dinitrotoluola? Dibutilftalata I tsentralita v ballistitnyh porohah / A.M. Sadovnikov, A.I. Volkova, M.P. Baranova, V.E. Shkolnyy // Voprosy spetsialnogo mashynostroeniya, seriya II. – 1974. – Vyp. 2 (2). – P. 45–49.
5. Malkin A.Ya. Diffuziya i vyazkost polimerov. Metody issledovaniya / A.Ya. Malkin, A.E. Chalyh. – M.: Himiya, 1979. – 301 p.

УДК 678.544:66.08

Лукашев В.К., Онда В.И., Шевцова Т.Н.

ПОВЕРХНЕВА МОДИФІКАЦІЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ НІТРАТІВ ЦЕЛЮЛОЗИ ПЛАСТИФІКУЮЧОЮ РЕЧОВИНОЮ

Проведено експериментальні дослідження, в результаті яких встановлено закономірності поверхневої модифікації пластифікуючою речовиною гранул, виготовлених лаковим способом зі складу на основі нітрату целюлози. На підставі одержаних даних запропоновано емпіричні залежності, які дозволяють розраховувати кількість дибутилфталату, що перейшло у нітратцелюлозні гранули протягом заданого часу при обробці їх рідинним і емульсійним способом.

Lukashev V.K., Onda V.I., Shevtsova T.N.

THE SURFACE MODIFICATION OF THE GRANULAR CELLULOSE NITRATE WITH THE PLASTICIZING SUBSTANCE

The experimental studies are conducted, as a result of that the regularities of the surface modification with the plasticizing substance of the granules made with the varnish method from the composition on the basis of cellulose nitrate are set. The empirical dependences for calculating the amount of dibutylphthalate which passed into the cellulose nitrate granules during the set time at treatment of their with liquid and emulsion method are offered based on the obtained data.

УДК 532.5

Бозбей Л.С., Борц Б.В., Костиков А.О., Ткаченко В.И.

РАЗРУШЕНИЕ ЯЧЕЕК БЕНАРА ПРИ ЛОКАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЯХ ТЕПЛОВОГО РАВНОВЕСИЯ И ИХ ФОРМИРОВАНИЕ НАД ЯЧЕЙКАМИ БЕНАРА

Введение. Открытое Клодом Анри Бенаром (1874–1939), французским физиком, явление самоорганизации при тепловой конвекции в слое вязкой, подогреваемой снизу жидкости, продолжает интересовать исследователей более века [1]. Причина интереса кроется в удивительной универсальности обнаруженного явления. Оно, возможно, наблюдается на Солнце, проявляется в атмосфере Земли, используется в различных технологических процессах, нередко встречается и в быту. Во всех таких проявлениях внимание исследователей, как правило, обращено на сформировавшуюся пространственно-периодическую структуру различной конфигурации: от полос до плотно замощенных многоугольниками (не обязательно правильными) поверхностей подогреваемой снизу вязкой жидкости, отражающих ее конвективные перемещения между границами слоя. Однако, до настоящего времени, остались без внимания вопросы существования элементарных конвективных ячеек (первоячеек), из которых формируются системы ячеек Бенара. Как показывают эксперименты [2], пространственно периодические структуры возникают не мгновенно, а существует интервал времен, в течение которого растет число разрозненных цилиндрических конвективных ячеек. Затем их количество увеличивается и, в конечном итоге, они заполняют весь объем жидкости, образуя, например, ячейки Бенара. В работах [2, 3] предложено описание элементарной конвективной ячейки (первоячейки), из большого количества которых образуются пространственно-периодические устойчивые во времени структуры.

В связи с формированием таких пространственно-периодических структур возникает закономерный интерес в исследовании их влияния на ограничивающее сверху пространство, которое может быть как жидким, так и газообразным. В литературе упоминается эксперимент по моделированию формирования конвективных ячеек в слое силиконового масла со свободными границами, расположенного над слоем ртути, а сверху ограниченного слоем гелия [4]. В этих экспериментах не отмечено формирование конвективных ячеек в гелии над ячейками в масле, хотя наблюдения нижней границы облаков [5], а также границы вакуумное масло-воздух [2] указывают на образование ячеек Бенара в пограничных средах. Поэтому исследование образования конвективных ячеек сформированными ячейками Бенара представляется актуальным для определения условий и физических основ их возникновения.

Наряду с явлением формирования устойчивых во времени пространственно-периодических структур, остаются не исследованными процессы их разрушения. Наглядным примером такого разрушения, по-видимому, являются выбросы протуберанцев из конвективной зоны Солнца. Поэтому определение условий разрушения конвективных ячеек, и связанных с ними механизмов разрушения, также является актуальной проблемой.

Поставленные вопросы относительно формирования и разрушения конвективных структур требуют экспериментального исследования и теоретического анализа для объяснения природы таких явлений.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование разрушения конвективных ячеек для различных механизмов нарушения теплового равновесия, включая процессы разрушения конвективных ячеек на Солнце, а также исследование процесса формирования ячеек Бенара другими ячейками Бенара.

Описание экспериментов по формированию конвективных ячеек в цилиндрических сосудах с маслом.

Эксперименты по формированию конвективных ячеек проводились с использованием вакуумного масла VM-5 (2 мл), в которое для визуализации движения масла добавлялось небольшое количество алюминиевой пудры (0,056 г).

Условия проведения экспериментов. В цилиндрическую емкость радиусом 26 мм и высотой 2,5 мм наливалось масло толщиной слоя порядка 1 мм. Подогрев емкости осуществлялся снизу от электрической печи, температура масла на дне емкости могла подниматься до уровня 220 °С. Кинематическая вязкость вакуумного масла при указанных температурах оценивалась величиной 10 мм²/с [6].

Эксперименты проводились в два этапа.

На первом этапе определялись условия возникновения долгоживущих конвективных ячеек в виде плотно упакованных многоугольников, в том числе гексагонов. В ходе экспериментов было показано, что при достижении температуры дна емкости $T \approx 120 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ в вакуумном масле с толщиной слоя порядка 1,0 мм возникали ячейки Бенара диаметром 3,2 мм [2, 3].

На втором этапе на верхней границе масла создавались условия, приводящие к быстрому во времени (по сравнению со временем существования ячеек Бенара) изменению его температуры. В качестве таких условий были использованы либо микрокапли холодного масла такого же сорта, сброшенные на поверхности масла с помощью 1 мл шприца с иглой 0.4×13, либо разогретая до температуры дна емкости медная проволока, поднесенная к центру одной из ячеек Бенара.

Разрушение конвективных ячеек при охлаждении верхней границы, вызванном добавлением микрокапли более холодного масла. На верхнюю границу ячеек Бенара из шприца емкостью 1 мл сбрасывалась микрокапля вакуумного масла без добавления алюминиевой пудры с температурой $T=17 \text{ } ^\circ\text{C}$. Из-за большой разницы температур верхнего слоя масла и микрокапли наблюдался эффект Лейденфроста [7], когда жидкость микрокапли в контакте со значительно более горячим маслом образует изолирующий слой пара, который предохраняет жидкость микрокапли от быстрого выкипания. В результате этого микрокапля какое-то время перемещается по поверхности масла на паровой подушке, образуемой на ее нижней границе. Описанные выше процессы отражены на рис. 1 а, б, в.



Рисунок 1 – Разрушение ячеек Бенара в вакуумном масле микрокаплей охлажденного вакуумного масла

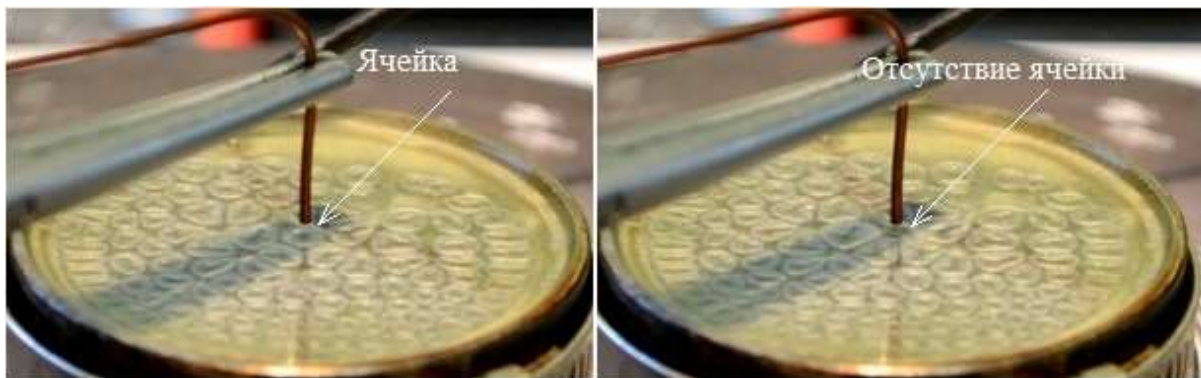
Затем температура микрокапли приближается к температуре верхней границы масла, микрокапля разрушается и растекается по поверхности масла, тем самым понижая температуру этой поверхности.

На рис. 1а показано начальное положение микрокапли вакуумного масла после ее сброса из иглы шприца на поверхность масла. На рисунке видно, что сначала микрокапля располагается справа от центра конвективной ячейки. Затем она из-за эффекта Лейденфроста смещается немного вправо (рис. 2б) от центра ячейки. После растекания более холодного масла микрокапли по поверхности ячейки (рис. 3в) наблюдается ее разрушение. По нашим оценкам разрушение ячейки обусловлено понижением температуры верхней границы конвективной ячейки, т.к. понижение температуры увеличивает число Рэлея, и переводит собственное число λ граничной задачи из нулевого значения, соответствующего стационарному состоянию [3], в область отрицательных чисел, при которых нарушается равновесие и конвективная ячейка разрушается.

Следует отметить, что сброс микрокапли горячего масла на конвективную ячейку не приводит к появлению эффекта Лейденфроста и не приводит к ее разрушению.

Таким образом, экспериментально показано, что уменьшение температуры верхней границы конвективной ячейки в результате сброса на ее поверхность более холодной капли масла приводит к разрушения конвективной ячейки.

Разрушение конвективных ячеек при бесконтактном нагреве верхней границы масла медным щупом. В экспериментах на верхнюю границу выбранной конвективной ячейки бесконтактно воздействовали тонким разогретым медным щупом с диаметром 1 мм, не нарушающим конвективный поток в ячейке. Начало и окончание процесса воздействия щупа на ячейку показано на рис. 2 а и б, соответственно. Из приведенных снимков следует, что в начале процесса ячейка была устойчива и имела четко очерченные границы. После приближения к центру конвективной ячейки разогретого медного щупа с диаметром $d_{pr} = 1$ мм в течение 1–2 секунд происходило разрушение ячейки, заключающееся в исчезновении ее границы и разрушении конвективного потока. Затем, в течение определенного времени, на месте исчезнувшей ячейки снова появлялась конвективная ячейка такого же вида.



а

б

Рисунок 2 – Разрушение ячейки Бенара из вакуумного масла медным щупом

На рис. 2а показаны: конвективная ячейка до приближения к ней разогретого медного щупа, и после его приближения к центру ячейки (рис 2б). На рис 2б видно, что

после воздействия разогретого медного щупа происходит разрушение конвективной ячейки.

Исходя из проведенного эксперимента можно сделать вывод, что увеличение температуры верхней границы конвективной ячейки в вакуумном масле в результате воздействия разогретым медным щупом приводит к ее разрушению.

Разрушение конвективных ячеек на Солнце, как результат быстрого нагрева их нижней границы. Известно, что в конвективной зоне Солнца, протяженностью 2×10^5 км, наблюдаются конвективные ячейки Бенара различных масштабов. Особое внимание в связи со вспышками на Солнце привлекают супергранулы, расположенные в нижних слоях конвективной зоны с характерными размерами: диаметр – $(2-4) \times 10^4$ км, толщина – $(3-8) \times 10^3$ км [7–10]. Время жизни супергранул составляет величину порядка $\tau_0 \approx 20-36$ часов. Движение солнечного вещества соответствует движению в l -ячейках [11], т. е. в центре ячейки вещество движется от центра Солнца.

В этой связи представляется интересным рассмотреть вспышки на Солнце [12, 13], как рассмотренный выше результат быстрого изменения температуры нижней границы конвективных ячеек (супергранул). На рис. 3 приведены фотографии отдельных моментов мощной солнечной вспышки, полученные покадровой разверткой видеоклипа солнечной вспышки, зарегистрированной американским космическим агентством (NASA) 01.09.2014 [13].

Согласно [13] статистический анализ данных о мягком рентгеновском излучении Солнца выделяет три типа вспышек: быстрые вспышки длительностью не более 30 мин; типичные двухленточные вспышки длительностью до 1–2 часов; редкие, очень продолжительные события (LDE – Long Duration Event). LDE состоят из вспышек со сложной пространственно-временной структурой. В них одна или несколько вершин вспышек могут формировать постэруптивные петли в виде арок. Подъем арочной системы, как правило, завершается на высотах от 3×10^4 до 10^5 км, но в редких случаях части арочных систем уходят в межпланетное пространство.

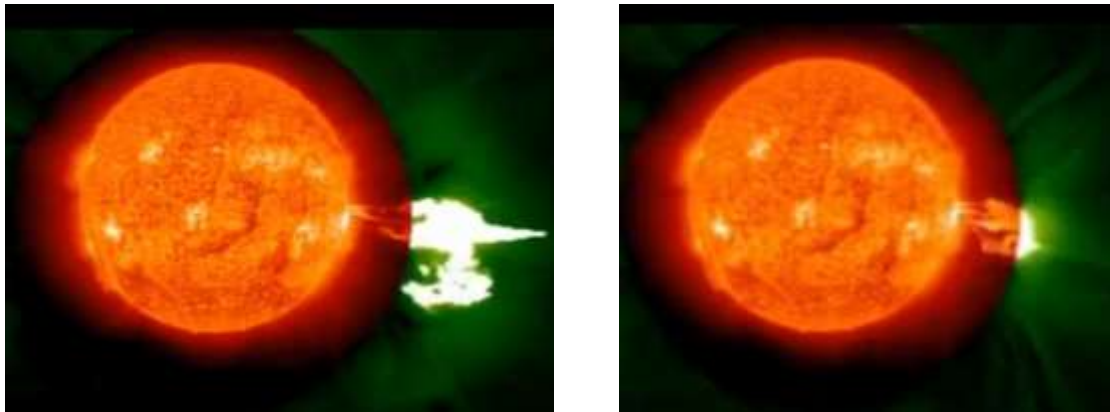
На рис. 3 видно, что вспышка завершается на высотах порядка диаметра Солнца, и относится к тому виду, когда арочные системы уходят в межпланетное пространство. Изображенные фрагменты вспышки говорят о том, что она, по-видимому, формируется несколькими соседними супергранулами. Вывод об участии во вспышке нескольких супергранул следует из следующих визуальных фактов:

1. Площади нескольких активных пятен на диске Солнца, которые не приводят к выбросу вещества, сформированы из нескольких супергранул;
2. Наличие линейчатой засветки в основании солнечной вспышки свидетельствует о том, что каждая такая линия соответствует выбросу вещества из центра задействованных во вспышке супергранул.

Оценка диаметра основания солнечной вспышки, проведенная с использованием рис. 3, дает величину в диапазоне от 6×10^4 км до 12×10^4 км. Этот результат также подтверждает сделанный ранее вывод о том, что во вспышке могут принимать участие несколько супергранул.

На видеоклипе солнечной вспышки от 01.09.2014 [13] видно, что хвостовая часть выброшенного вещества под силой тяжести возвращается на поверхность Солнца, а головная часть уходит в межпланетное пространство. По-видимому, это объясняется тем, что головная часть солнечной вспышки в процессе развития неустойчивости в супергрануле приобретает вторую космическую скорость ($V_2 = \text{км/с}$) и может преодолеть притяжение Солнца.

Нижче приведемо оцінки, указуючі на можливість розвитку неустойчивости в окремо взятої супергранулі в результаті підвищення температури її нижньої границі.



а

б

Рисунок 3 – Окремі моменти потужної сонячної вибушки, зареєстрованої NASA 01.09.2014

Опишемо швидкість, час існування і відстань вибуха сонячної вибушки, базуючись на аналізі процесів в складових її супергранулах. Для цього представимо розподіл швидкостей в окремо взятої супергранулі вираженнями, описуючими розподіл швидкостей в елементарній конвективній ячейці з вільними граничними умовами з модовим числом $n = 1$ [2, 3]:

$$V_z(r, z, t) = A \sin(\pi z) J_0(k_{r,1} r) \exp(-\lambda_{1,1}^- (Ra) t); \quad (1)$$

$$V_r(r, z, t) = -A \pi \sin(\pi z) J_0(k_{r,1} r) \exp(-\lambda_{1,1}^- (Ra) t), \quad (2)$$

де $\lambda_{1,1}^- (Ra) = \frac{P+1}{2P} (\pi^2 + k_{r,1}^2) - \left[\left[\frac{P+1}{2P} (\pi^2 + k_{r,1}^2)^2 + \frac{Ra \cdot k_{r,1}^2}{P(\pi^2 + k_{r,1}^2)} \right]^{1/2} \right]$ – власні числа,

характеризуючі затухання ($\lambda_{n,1}^- > 0$), наростання ($\lambda_{n,1}^- < 0$) або стаціонарне стан ($\lambda_{n,1}^- = 0$) збурених швидкостей, $Ra = g_{sun} \beta h^3 \theta / \nu \chi$ – число Релея, h – товщина ячейки, g_{sun} – прискорення вільного падіння на Сонці, $P = \nu / \chi$ – число Прандтля, ν і χ – коефіцієнти кінематичної в'язкості і температуропроводності рідини відповідно, β – коефіцієнт об'ємного температурного розширення речовини, $J_l(x)$ – функції Бесселя першого роду l -го порядку від аргумента x ; $k_{r,1} = \sigma_{1,1} R_c^{-1}$ – радіальне хвильове число, характеризуюче залежність збурень від поперечної координати r , z – вертикальна координата, $\sigma_{1,1}$ – 1-й нуль функції Бесселя першого роду першого порядку ($J_1(\sigma_{1,i}) = 0$), – безрозмірний радіус конвективної ячейки.

Спокойная фаза Солнца. В стаціонарному стані $\lambda_{1,1}^- = 0$. Згідно [10, 17], в стаціонарному стані значення числа Релея для супергранули приймає значення

$R_s = 2 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^{11}$, що значительно превышает критического числа Рэлея при свободной конвекции [15, 18]: $R_m = \frac{27}{4} \cdot \pi^4 \approx 657,511$. Поэтому необходимо устранить это разногласие в определении значения числа R_s . Для этого вычислим число Рэлея, используя следующие характерные параметры для Солнца: $P \approx 0,7 \dots 1,0$ [10, 17]; $\nu \leq 2 \cdot 10^9$ м²/с [19]; $h = 10^7$ м [10]; $n^* = 274$ м/с²; $\Theta = T_2 - T_1 \approx 10^6$. Необходимо отметить, что значение кинематической турбулентной вязкости $\nu \leq 2 \cdot 10^9$ м²/с подтверждается простым расчетом: $\nu = h^2 / \tau_v = 10^{14} \text{ м}^2 / (0,72 \dots 1,3) \cdot 10^5 \text{ с} = (0,76 \dots 1,4) \cdot 10^9$ м²/с.

При расчетах полагаем, что в нижних слоях конвективной зоны при $0,94 \geq r / r_{sun} \geq 0,86$ (r_{sun} – радиус Солнца), где расположены супергранулы, температура изменяется по линейному закону $T(z) = T_2 - (T_2 - T_1) \frac{z}{h}$ в пределах от $T_2 = 2,2 \cdot 10^6$ К до $T_1 = 1,4 \cdot 10^6$ К [20–22].

Для вычисления числа Рэлея R_s необходимо определить величину коэффициента объемного температурного расширения солнечного вещества β .

При вычислении β будем исходить из того факта, что солнечное вещество в конвективной зоне представляет собой смесь газов (водород 68 % и гелий 30 % [21]) в ионизованном состоянии, т.е. существует в виде плазмы. В этом случае в качестве расширяющегося под действием температуры объема выберем объем плазмы, ограниченный радиусом Дебая [23]: $V = \frac{4\pi}{3} r_D^3$, где $r_D = \sqrt{\frac{kT(z)}{4\pi e^2 n(z)}}$, $n(z)$ – плотность ионизованного солнечного вещества, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона.

В этом случае для коэффициента объемного температурного расширения справедливо выражение:

$$\beta(z) = \frac{3}{r_D} \frac{dr_D}{dT} = \frac{3}{2T(z)} \left[1 + \frac{m_s g^*}{k} \left[\left[\frac{dT(z)}{dz} \right]^{-1} - \frac{z}{T(z)} \right] \right] = \frac{3}{2T(z)} \left[1 + \frac{m_s g^*}{k} \frac{T_2 h}{\Theta T(z)} \right], \quad (3)$$

где $m_s = 0,68m_H + 0,3m_{He} = 0,68m_p + 0,3 \cdot 4m_p = 1,88m_p$ – средняя масса иона солнечного вещества, m_p – масса протона. Выражение (3) получено с использованием барометрической формулы [24] для солнечного вещества.

Для определения числа Рэлея в качестве коэффициента объемного расширения β используем его усредненную по высоте ячейки величину $\beta = \bar{\beta}(z) = h^{-1} \int_0^h \beta(x) dx$ и выберем значение числа Прандтля $P \approx 0,75$. При выбранных выше значениях параметров коэффициент объемного расширения равен $\beta = 4,179 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$.

Окончательно, для числа Рэлея R_s получим численное значение

$$R_s = \frac{g^* \beta h^3 \Theta}{\nu \chi} = \frac{274 \frac{M}{c^2} \cdot 4,179 \cdot 10^{-9} \frac{1}{K} \cdot 10^{21} M^3 \cdot 7,9 \cdot 10^5 K}{10^9 \frac{M^2}{c} \cdot 1,34 \cdot 10^9 \frac{M^2}{c}} = 675,08, \text{ которое количественно}$$

соответствует критическому числу Рэлея R_s для свободной конвекции.

Таким образом, параметры супергранулы в спокойной фазе Солнца (в стационарном состоянии), когда выполнено равенство $\lambda_{1,1}^- = 0$, однозначно описываются выражениями (1)-(3).

Активная фаза Солнца. Спокойная фаза Солнца может быть нарушена, если температура нижней границы супергранулы увеличится за время Δt , которое значительно меньше характерного времени существования супергранулы: $\Delta t \ll \tau_{v1}, \tau_{v2}$, где $\tau_{v1} = (1,4 \pm 0,6) \cdot 10^5$ с или $\tau_{v2} = (1,56 \pm 0,78) \cdot 10^5$ с [10]. В силу внутренних процессов на Солнце значение температуры нижней границы, как правило, нескольких супергранул может достигать значения на порядок превышающее T_2 [22]. Такое изменение температуры увеличивает число Рэлея R_s , что в свою очередь изменяет собственное число $\lambda_{1,1}^-$ в выражениях (1), (2) со стационарного нулевого значения на отрицательное, приводя к экспоненциальному росту амплитуды вертикальной скорости (1).

Из выражения (1) можно оценить время нарастания вертикальной скорости, если задать следующие исходные параметры:

– начальная вертикальная скоростью солнечного вещества в центре супергранулы 30 м/с [10];

– радиальное волновое число соответствует критическому значению: $k_{r,1} = \pi / \sqrt{2} \approx 2,221$;

– конечная скорость выброса солнечного вещества порядка или превышает вторую космическую скорость 617,7 км/с;

– характерное время активной фазы Солнца значительно меньше характерного времени спокойной фазы Солнца: $t_{v1,v2}^a \approx 10^{-3} \cdot \tau_{v1,v2}$.

В предположении, что температура нижней границы супергранулы увеличивается до температуры ядра [22], вертикальная скорость (1) будет экспоненциально нарастать по закону $V_z(r, z, t) \propto \exp(\lambda_{1,1}^-(15,5R_m)|t)$, т. е. солнечное вещество на оси ячейки будет ускоряться.

Оценим характерные параметры "солнечного ускорителя" в результате увеличения числа Рэлея до температуры ядра Солнца. Расчеты показывают, что собственное число задачи в этом случае принимает значение $\lambda_{1,1}^-(15,5R_m) \approx -50,0$. Тогда время ускорения солнечного вещества до, как минимум, второй космической скорости V_2 , оценивается

$$\text{величиной} \quad T_1 = \frac{\tau_{v1}^a}{50} \ln \left[\frac{6,177 \cdot 10^5}{30} \right] = (2,9 \pm 1,3) \cdot 10 \text{ с} \quad \text{или}$$

$$T_2 = \frac{\tau_{v2}^a}{50} \ln \left[\frac{6,177 \cdot 10^5}{30} \right] = (3,1 \pm 1,55) \cdot 10 \text{ с.}$$

В дальнейшем будем считать, что для активной фазы Солнца среднее время ускорения равно: $\bar{T} = 3 \cdot 10 \text{ с.}$

После приобретения солнечным веществом второй космической скорости 617,7 км/с расстояние выброса эруптивной вспышки составит $L_a \approx 7 \cdot 10^8$ м, а время выброса – $T_a \approx 2,23 \cdot 10^3$ с.

Следует отметить, что решения (1), (2) и вывод об ускорении солнечного вещества справедливы для малых амплитуд возмущений скорости, когда можно пренебречь квадратичными слагаемыми в системе нелинейных уравнений Навье-Стокса [18]. Это требование дает ограничение на возмущенную вертикальную скорость солнечного вещества $V_z(0,1,t)$:

$$\frac{|\lambda_{1,1}^-(15,5R_m)|}{\pi} \frac{10^7}{T} = \frac{50 \cdot 10^7}{\pi \cdot 3 \cdot 10} = 5,3 \cdot 10^6 \frac{M}{c} \gg |V_z(0,1,t)| \frac{M}{c}, \quad (4)$$

которая может достигать значения второй космической скорости V_2 .

Таким образом, в данном разделе предложено рассматривать разрушение супергранул на Солнце, как результат быстрого нагрева их нижней границы. Описан метод определения коэффициента объемного расширения солнечного вещества, применение которого позволило показать, что число Рэлея и соответствующее ему волновое число для супергранулы спокойной фазы Солнца соответствуют критическим числам Рэлея для свободной ячейки. Увеличение на порядок температуры супергранулы приводит к увеличению числа Рэлея, и как следствие, к ускорению солнечного вещества. Показано, что время ускорения солнечного вещества, например, до второй космической скорости, составляет в среднем $\bar{T} = 3 \cdot 10$ с, а вынос солнечного вещества (эруптивная вспышка) происходит за время $T_a \approx 2,23 \cdot 10^3$ с, и простирается на расстояние, сравнимые с радиусом Солнца: $L_a \approx 7 \cdot 10^8$ м.

Формирования воздушных ячеек Бенара над ячейками Бенара в вакуумном масле. В работе экспериментально исследовано формирования воздушных ячеек Бенара над ячейками Бенара, которые образованы в вакуумном масле с добавлением алюминиевой пудры.

Для формирования ячеек Бенара из масла использовалось вакуумное масло ВМ–5 (2 мл) и небольшое количество алюминиевой пудры (60 мг). Температура нижней границы масла поддерживалась на уровне 120 ± 1 °С, верхней – на 10 °С меньше. После образования ячеек Бенара в масле, емкость накрывалась прозрачным стеклянным колпаком, под который для визуализации конвективных процессов в воздухе запускался дым.



Рисунок 4 – Воздушные ячейки Бенара над ячейками Бенара из вакуумного масла

На рис. 4 видно, что над поверхностью масла формируются воздушные ячейки Бенара, которые имеют размеры, повторяющие размеры масляных ячеек. Направление конвекции в воздушных ячейках соответствует конвекции в g – ячейках [11], т.е. противоположно направлению конвекции в l – ячейках в масле.

Идентичность геометрических размеров конвективных ячеек в масле и воздухе объясняется их подобием. Конвективные течения в масле и воздухе подобны, когда числа Рэлея и Прандтля одинаковы [15, 18]. Покажем, что это так.

Значение числа Рэлея R приведено в пояснениях к выражениям (1), (2), где вместо g^* необходимо подставить ускорение свободного падения на Земле $g=9,81 \text{ м/с}^2$. При вычислении чисел Рэлея R для воздуха и масла необходимо использовать данные табл. 1.

Таблица 1 – Теплофизические параметры сред [16]

Наименование параметров	Воздух	Масло
β, K^{-1}	2.68×10^{-3}	2.97×10^{-3}
$\Delta T, \text{°C}$	20	20
$L, \text{м}$	2×10^{-3}	2×10^{-3}
$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	2.29×10^{-5}	1×10^{-5}
$\chi, \text{м}^2/\text{с}$	2.216×10^{-7}	7.38×10^{-7}

Исходя из данных [15], найдем отношение чисел Рэлея (воздух-масло):

$$\frac{(Ra)_{oil}}{(Ra)_{air}} = \frac{9,81 \cdot 2,97 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{7,38 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-5}} = \frac{623}{829} = 0,75 \pm 0,3. \quad (5)$$

Результат вычислений в (5) показывает, что числа Рэлея для воздуха и вакуумного масла в пределах погрешностей их измерений совпадают.

Зеркальная симметрия пространственного расположения и распределения скоростей в конвективных ячейках объясняется явлением увлечения частичек воздуха движущимися частичками масла на границе их раздела из-за развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [25].

Таким образом, вычисления показывают, что числа Рэлея для двух сред попадают в интервал, где они равны. Отсюда следует, что ячейки Бенара, образованные в воздухе и в масле, подобны, т. е. описываются одинаковыми решениями.

Выводы. В данной работе проведены эксперименты по исследованию разрушения конвективных ячеек Бенара. Разрушение конвективных ячеек Бенара проводилось двумя способами: микрокаплей охлажденного вакуумного масла, сброшенной на поверхность сформировавшихся ячеек Бенара и существующей на ней длительное время благодаря эффекту Лейденфроста, локальным изменением температуры верхней границы слоя нагретым медным щупом большого диаметра. В качестве примера рассмотрено

разрушение конвективных ячеек на Солнце, как результат быстрого нагрева их нижней границы. Дано математическое обоснование такого разрушения. Описан метод определения коэффициента объемного расширения солнечного вещества, применение которого позволило показать, что число Рэлея для супергранулы соответствует критическому числу Рэлея для свободной ячейки. Показано, что увеличение на порядок температуры нижней границы супергранулы приводит к увеличению числа Рэлея, и как следствие, к ускорению солнечного вещества. При этом время ускорения солнечного вещества, например, до второй космической скорости, составляет $\bar{T} = 3 \cdot 10$ с, а вынос солнечного вещества (эруптивная вспышка) происходит за время $T_a \approx 2,23 \cdot 10^3$ с, и простирается на расстояние, сравнимые с радиусом Солнца: $L_a \approx 7 \cdot 10^8$ м.

Описан и анализируется экспериментальный результат по формированию воздушных ячеек Бенара над ячейками Бенара из вакуумного масла. Дано объяснение соответствия размеров воздушных ячеек Бенара и ячеек Бенара в масле.

Литература

1. Bernard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide // *Revue generale des Sciences, pures et appliques.* – 1900. – V. 11. – P. 1261–1271 and 1309–1328.
2. Бозбей Л.С. // Элементарная конвективная ячейка в слое несжимаемой, вязкой жидкости. Конференция молодых ученых и специалистов; ИПМаш НАН Украины, - Харьков, 2013, с. 29.
3. Бозбей Л.С., Костиков А.О, Ткаченко В.И. // Элементарная конвективная ячейка в слое несжимаемой, вязкой жидкости и её физические свойства. Международная конференция MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность»; Институт космических исследований, Россия, Москва, 2014г., с. 322–328.
4. Goldstein R.J., Graham D.J. Stability of a horizontal fluid layer with zero shear boundaries. *Phys. Fluids.* – 969. – V. 12. – No. 6. P. 1133–1137.
5. <http://oceanfromspace.scanex.ru/index.php/atmosphere/convectiveyacheik>.
6. Eckert K., Bestehorn M., Thess A.E. // *J. Fluid Mech.* 1998. Vol. 356. P. 155–197.
7. H. Linke, B.J. Aleman, L.D. Melling, M.J. Taormina, M.J. Francis, C.C. Dow-Hygelund, V. Narayanan, R. P. Taylor, and A. Stout. Self-Propelled Leidenfrost Droplets. *Phys. Rev. Lett.* 96, 154502 (2006).
8. Пикельнер С.Б. // УФН. 1966. Том. 88. Вып. 3. С. 505–523.
9. Sands J.S., Rast M.P. // (unpublished manuscript), <http://opensky.library.ucar.edu/collections/SOARS-000-000-000-268>.
10. Rieuton M., Rincon F. The Sun's Supergranulation / *Living Rev. Solar Phys.*, 2010, V. 7, No 2, – p. 84.
11. Гетлинг А.В. // УФН. 1991. Том 161. Вып. 9. С. 1–80.
12. http://www.bbc.co.uk/russian/multimedia/2013/05/130515_v_solar_flares.shtml.
13. http://www.bbc.co.uk/russian/multimedia/2014/09/140901_solar_flares.shtml.
14. Григорьева И.Ю. Исследование эруптивных событий на Солнце по наблюдениям на РАТАН-600. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург 2010 г., 21 с.

15. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. «Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости», издательство «Наука», Москва, 1972, 392 с.
16. Волков А.И., Жарский И.М. «Большой химический справочник», 2005, 607 с.
17. Сотникова Р.Т. Введение в гелиофизику: учеб. пособие / Р.Т. Сотникова, В.Г. Файнштейн. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 256 с.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Т. 6. Гидродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.– 736 с.
19. Пипин В.В. Вариации светимости, радиуса и квадрупольного момента солнца как результат динамо крупномасштабных магнитных полей в солнечной конвективной зоне / *Астрономический журнал*, 2004, том 81, №5, с. 459–474.
20. Якубовский Е.Г. Механизм возникновения тепловой энергии планет / *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2012.– №7.– С. 46–51.
21. *Физическая энциклопедия* / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол; Д.М. Алексеев, А.М. Балдин, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 4. Пойнтинга – Робертсона – Стримеры. 1994. 704 с.
22. Bahcall J.N., Huebner W.F., Lubow S.H., Parker P.D., Ulrich R.K. Standard solar models and the uncertainties in predicted capture rates of solar neutrinos / *Reviews of Modern Physics*, 1982. – Vol. 54, No. 3, p. 767–799.
23. *Электродинамика плазмы*. Под. ред. А.И. Ахиезера.– М.: Изд.-во Наука, 1974, 720 с.
24. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. Теоретическая физика. Статистическая физика / 3 изд., испр.-М. Наука, 1976.–584 с. (т. V).
25. Ламб Г. Гидродинамика. М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947. – 928 с.

Bibliography (transliterated)

1. Bernard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide // *Revue generale des Sciences, pures et appliques*. – 1900. – V. 11. – P. 1261–1271 and 1309–1328.
2. Bozbey L.S. // *Elementarnaya konvektivnaya yacheyka v sloe neszhimaemoy, vyzkoy zhidkosti. Konferentsiya molodyih uchenyih i spetsialistov; IPMash NAN Ukrainyi*, – Harkov, 2013, p. 29.
3. Bozbey L.S., Kostikov A.O, Tkachenko V.I. // *Elementarnaya konvektivnaya yacheyka v sloe neszhimaemoy, vyzkoy zhidkosti i eYo fizicheskie svoystva. Mezhdunarodnaya konferentsiya MSS-14 «Transformatsiya voln, kogerentnyie strukturyi i turbulent-nost»*; Institut kosmicheskikh issledovaniy, Rossiya, Moskva, 2014g., p. 322–328.
4. Goldstein R.J., Graham D.J. Stability of a horizontal fluid layer with zero shear boundaries. *Phys. Fluids*. – 969. – V. 12. – No. 6. P. 1133–1137.
5. <http://oceanfromspace.scanex.ru/index.php/atmosphere/convectiveyacheik>.
6. Eckert K., Bestehorn M., Thess A.E. // *J. Fluid Mech*. 1998. Vol. 356. P. 155–197.
7. H. Linke, B.J. Aleman, L.D. Melling, M.J. Taormina, M.J. Francis, C.C. Dow-Hygelund, V. Narayanan, R. P. Taylor, and A. Stout1. Self-Propelled Leidenfrost Droplets. *Phys. Rev. Lett*. 96, 154502 (2006).
8. Pikelner S.B. // *UFN*. 1966. Tom. 88. Vyip. 3. P. 505–523.

9. Sands J.S., Rast M.P. // (unpublished manuscript), <http://opensky.library.ucar.edu/collections/SOARS-000-000-000-268>.
10. Rieuton M., Rincon F. The Sun's Supergranulation / Living Rev. Solar Phys., 2010, V. 7, No 2, – p. 84.
11. Getling A.V. // UFN. 1991. Tom 161. Vyip. 9. P. 1–80.
12. http://www.bbc.co.uk/russian/multimedia/2013/05/130515_v_solar_flares.shtml.
13. http://www.bbc.co.uk/russian/multimedia/2014/09/140901_solar_flares.shtml.
14. Grigoreva I.Yu. Issledovanie eruptivnykh sobyitiy na Solntse po nablyudeniym na RATAN-600. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Sankt-Peterburg 2010 g., 21 p.
15. Gershuni G.Z., Zhuhovitskiy E.M. «Konvektivnaya ustoychivost neshhimaemoy zhidkosti», izdatelstvo «Nauka», Moskva, 1972, 392 p.
16. Volkov A.I., Zharskiy I.M. «Bolshoy himicheskiy spravochnik», 2005, 607 p.
17. Sotnikova R.T. Vvedenie v geliofiziku: ucheb. posobie / R.T. Sotnikova, V.G. Faynshteyn. – Irkutsk : Izd-vo IGU, 2013. – 256 p.
18. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika: T. 6. Gidrodinamika. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986.– 736 p.
19. Pipin V.V. Variatsii svetimosti, radiusa i kvadrupolnogo momenta solntsa kak rezultat dinamo krupnomasshtabnykh magnitnykh poley v solnechnoy konvektivnoy zone / Astronomicheskii zhurnal, 2004, tom 81, #5, p. 459–474.
20. Yakubovskiy E.G. Mehanizm vozniknoveniya teplovoy energii planet / Mezhdunarodnyiy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2012.– #7.– P. 46–51.
21. Fizicheskaya entsiklopediya / Gl. red. A. M. Prohorov. Red. kol; D.M. Alekseev, A.M. Baldin, A.M. Bonch-Bruevich, A.S. Borovik-Romanov i dr. – M.: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya. T. 4. Poyntinga – Robertsona – Strimeryi. 1994. 704 p.
22. Bahcall J.N., Huebner W.F., Lubow S.H., Parker P.D., Ulrich R.K. Standard solar models and the uncertainties in predicted capture rates of solar neutrinos / Reviews of Modern Physics, 1982. – Vol. 54, No. 3, p. 767–799.
23. Elektrodinamika plazmy. Pod. red. A.I. Ahiezera.– M.: Izd.-vo Nauka, 1974, 720 p.
24. L.D. Landau, E.M. Livshits. Teoreticheskaya fizika. Statisticheskaya fizika / 3 izd., ispr.-M. Nauka, 1976.–584 p. (t. V).
25. Lamb G. Gidrodinamika. M.: OGIZ Gostehizdat, 1947. – 928 p.

УДК 532.5

Бозбей Л.С., Борц Б.В., Костіков А.О., Ткаченко В.І.

РУЙНУВАННЯ КОМІРОК БЕНАРА ПРИ ЛОКАЛЬНИХ ПОРУШЕННЯХ ТЕП- ЛОВОЇ РІВНОВАГИ І ЇХ ФОРМУВАННЯ НАД КОМІРКАМИ БЕНАРА

У роботі наведені результати експериментального дослідження руйнування комірок Бенара. Руйнування комірок Бенара виконувалось двома методами: додаванням мікрокраплі найбільш холодної вакуумної оливи на поверхню комірок та локальна змі-

на температури верхньої границі слою розігрітим мідним щупом. Було запропоновано вивчити руйнування конвективних комірок Бенара на Сонці (супергранул) шляхом швидкого нагріву їх нижньої границі. Наведено математичний опис механізму руйнування та методу розрахунку об'ємного розширення сонячної речовини. Отримано значення коефіцієнту об'ємного розширення, що дозволило зменшити число Релея супергранули до значення вільної комірки. Було показано, що збільшення порядку температури нижньої границі супергранули призводить до збільшення числа Релея та, як результат, до прискорення сонячної речовини. Оцінено час прискорення сонячної речовини, він складає $3 \cdot 10$ с, а час виносу сонячної речовини (еруптивного спалаху) складає майже $2,23 \cdot 10^3$ с. Розмір спалаху сонячної матерії $7 \cdot 10^8$ м та він порівняний із радіусом Сонця. Експериментальні результати формування комірок Бенара у повітрі та в оліві описані та чисельно проаналізовані. Пояснена відповідність розмірів комірок Бенара у повітрі та маслі.

Bozbiei L.S., Borts B.V., Kostikov A.O., Tkachenko V.I.

DESTRUCTION OF BERNARD CELLS UNDER LOCAL IRREGULARITIES OF THERMAL EQUILIBRIUM AND THEIR FORMING OVER THE BERNARD CELLS

Results of the experiments on destruction of Bernard cells are described. Destruction of BC was conducted by two ways: micro-drop of the cooled vacuum oil, dropped on the surface of the formed Bernard cells and local change of temperature of the upper border of the layer with heated copper wire. It was offered to study the destruction of convective Bernard cells on the Sun (super-granules) as the result of quick heating of their lower border. Mathematical description of the destruction mechanism is presented. Method of calculation of volume expansion of the solar matter is presented. Value of coefficient of volume expansion was obtained which allowed decreasing the Rayleigh number of the super-granule to the value of free cell. It was shown that increase on the order of the temperature of lower boundary of the super-granule, results in the increase of Rayleigh number and as a sequence in acceleration of the solar matter. Acceleration time of the solar matter to the second orbital velocity was estimated. It constitutes $3 \cdot 10$ s, and time of solar matter outburst (eruptive flare) is about $2,23 \cdot 10^3$ s. Distance of solar matter outburst is about $7 \cdot 10^8$ m and comparable with the Sun radius. Experimental results on forming the air Bernard cells over the oil Bernard cells is described and numerically analyzed. Correspondence of sizes of air Bernard cells to ones of oil Bernard cells is explained.

УДК 628.1

Дубовець О.М., Подустов М.О., Литвиненко Є.І., Пугановський О.В.

МОДЕРНІЗОВАНИЙ ОЧИСНИЙ ПРИСТРІЙ

Вступ. Очищенню рідких середовищ від механічних забруднень приділяють особливу увагу в системах автоматичного контролю. Навіть незначна кількість забруднюючих часток – негабаритів, може порушити роботу приладу або привести до повної відмови систему контролю. Особливо суттєвою ця проблема є для систем безперервного моніторингу забруднення води і стоків, що містять різноманітні за походженням механічні частки. Використання звичайних пористих фільтрів не завжди дає бажаний результат, так як вони потребують частої заміни. Для вирішення цієї проблеми використовують механічні пристрої та багатоступінчаті системи фільтрів, які певною мірою збільшують період між обслуговуванням очисної системи.

Колективом авторів було проаналізовано недоліки існуючої конструкції механічного очисного пристрою і розроблено модернізований пристрій для очищення рідких середовищ перед надходженням у вимірювальні прилади, в проточні тракти в яких не повинні потрапляти включення, що перевищують кондиційний – дозволений розмір. Такий пристрій дозволяє очистити вхідний потік від механічних забруднень або зменшити навантаження на наступну ступінь тонкого очищення, наприклад у системах автоматичного моніторингу.

У вимірювальній техніці відомий відцентровий очисний пристрій [1], що містить приймальну ємність з живильним і відвідним патрубками, очисний орган, встановлений з можливістю обертання над верхнім краєм відвідного патрубка. Очисний орган виконаний у вигляді двох верхнього і нижнього усічених конусів, з'єднаних меншими підставками, відвідний патрубок у верхній частині виконаний конусоподібним, при цьому твірна нижнього конуса очисного органу встановлена паралельно твірної конусоподібної верхньої частині відвідного патрубка і на відстані від неї, що дорівнює найбільшому діаметру частинок заданого розміру, а прийомна ємність похило встановленим в її нижній частині конвеєром.

Недоліком такого пристрою є його громіздкість, а також наявність в апараті рухомих частин, що може привести до зменшення терміну служби апарату і неможливість керування процесом очищення.

Найбільш близьким за призначенням і технічній сутності є пристрій для очищення технологічних рідких середовищ перед вимірювальними приладами [2].

Перевагами модернізованого очисного пристрою є:

- достатня ефективність при використанні на рідких середовищах, в яких негабарити мають постійну форму;
- можливість вибору і регулювання швидкості обертання дисків в залежності від фізичних властивостей речовини негабаритів.

До недоліків пристрою відносяться:

- наявність кільцевої щілини, складеної з обертового плоского диска і нерухомого кільцевого борту, в яку при обраній швидкості обертання можуть проникати частинки з розміром, більшим від дозволеного, так як в зазначеній кільцевій щілині рухомий

шар рідини, що створюється відцентровою силою і перешкоджає проходженню негабаритів, створюється тільки на поверхні обертового плоского диска;

– можливість засмічення кільцевих щілин негабаритами зі змінною формою (вата, обривки матеріалу або паперу), які можуть переміщатися між шарами рідини, що рухаються по верхній і нижній поверхні щілин в напрямку від центру, або навіть закривати щілину, не потрапляючи в неї. Завданням модернізації очисного пристрою є усунення недоліків прототипу із збереженням всіх його переваг.

Основна частина. За основу було взято конструкцію прототипу. Прототип містить живильний і відвідний патрубків, приймальну ємність, двигун, вал, очисний орган, збірний циліндричний бункер з нерухомим горизонтальним бортом, очисний орган виконаний з набору плоских кілець з хрестовиною, встановлених на валу двигуна паралельно один одному на відстані, величина якого визначається каліброваними шайбами з квадратним отвором, а ширина плоского кільця визначається за формулою $b = (0,30 - 0,35)R$, де R – радіус кільця, що приводить до збільшення ймовірності засмічення кільцевої щілини, складеної з рухомого плоского кільця і нерухомого кільцевого борту, можливості засмічення кільцевих щілин негабаритами зі змінною формою (вата, обривки тканини, папір).

До конструкції прототипу було внесено ряд змін. Згідно з модернізацією на верхній кришці двигуна встановлена нерухома вісь, а на його бічній стінці закріплений очисний орган, що складається з блоку обертання, вала і виштовхувачів, виконаних з пружинного дроту, при цьому вал двигуна, вісь і вал блоку обертання кінематично зв'язані за допомогою шестерень, а виштовхувачі закріплені на валу обертання блоку так, що їх максимальний вхід в кільцеві щілини вибирається в відповідності з умовою $\ell = (0,6 - 0,7)b$, де ℓ – максимальний вхід виштовхувачів в процесі обертання в кільцеві щілини, b – ширина плоского кільця з хрестовиною.

Схема модернізованого очисного пристрою представлена на рис. 1а, на рис. 1б показана форма кільцевих дисків, на рис. 3в показано взаємне розташування валу поворотного пристрою з виштовхувачами щодо обертових дисків.

Розроблений модернізований очисний пристрій містить живильний трубопровід 1, приймальну ємність 2, двигун 3, пристрій для кріплення двигуна 4, квадратний вал двигуна 5, суцільний диск 6, плоскі кільцеві диски 7 з хрестовинами, розділові шайби 8, нерухомий кільцевий борт 9, збірний бункер 10, відвідний патрубок 11, нерухому вісь 12, поворотний пристрій 13, вал поворотного пристрою 14, шестерні 15, 16, 17, виштовхувачі 18. При цьому поверхні суцільного диска 6, плоских кільцевих дисків з хрестовинами 7 і кільцевий борт 9 утворюють кільцеві щілини, через які рідке середовище перетікає з приймальної ємності 2 у збірний бункер 10.

Модернізований очисний пристрій встановлено в приймальній ємності 2 нижче рівня H рідини (рідкого середовища). Очисний орган даного пристрою складається з паралельно встановлених на валу двигуна 5 суцільного диска 6, набору плоских кілець 7 з хрестовиною, розділених каліброваними шайбами 8. При цьому під нижнім плоским кільцем паралельно йому встановлено кільцевий борт 9 збірного бункера 10 з вивідним патрубком 11. Калібровані шайби 8 і хрестовини плоских кілець мають квадратні отвори, що забезпечує їх нерухомість на валу двигуна 5.

На верхній кришці двигуна 3 встановлена нерухома вісь 12 на бічній стінці закріплено поворотний пристрій 13, в підшипниках якого встановлений вал 14 поворот-

ного пристрою. Вал двигуна 5, вісь 12 і вал 14 поворотного пристрою кінематично з'єднані шестернями 15, 16, 17, при цьому шестерня 17 обертається на осі 12, передаючи обертання від шестерні 15 шестерні 17 і змінюючи напрямок обертання шестерні 17 щодо шестерні 16. У нижній зоні поворотного вала 14 встановлені виштовхувачі з пружинного дроту. Виштовхувачі розташовані паралельно один одному і на відстані, що забезпечує їх занурення в кільцеві щілини (в простір між дисками) на величину $l = (0,5-0,7)b$, де b – ширина плоского кільця, довжина виштовхувача l вибирається з урахуванням мінімізації розмірів (габаритів) очисного пристрою. При цьому відстань між обертовими дисками очисного пристрою 6-7 і 7-7, дорівнює $0,9 D_э$, а відстань між нижнім диском 7 і кільцевим бортом 9 збірника 10, дорівнює $0,7 D_э$.

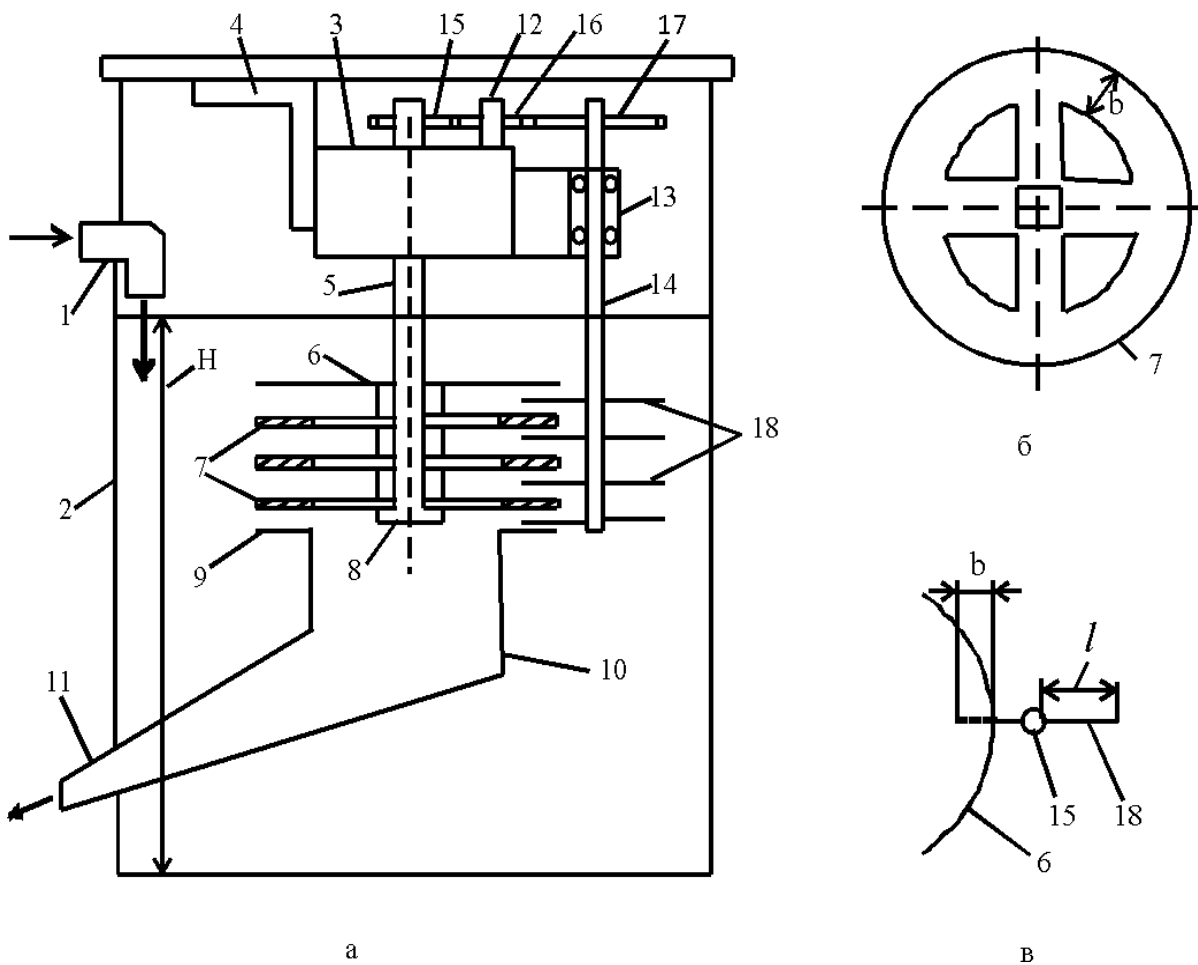


Рисунок 1 – Схема очисного пристрою: а – загальна схема пристрою;
б – форма кільцевих дисків; в – взаємне розташування валу, виштовхувачів і дисків

Робота модернізованого очисного пристрою здійснюється наступним чином. Приводиться в обертання двигун 3, на валу якого знаходиться очисний орган (6, 7, 8). Рідке середовище, в якому присутні негабарити, подається через живильний патрубок 1 в приймальну ємність 2, і заповнює її до рівня H , при якому очисний орган занурений в рідку середу. При цьому через шестерні 15, 16, 17 приводиться в обертання вал 14 поворотного пристрою 13, закріпленого на корпусі двигуна 3, і обертаються в бік, протилежний обертанню плоских кілець 7 виштовхувачі 18, закріплені на валу 14 поворотного-

го пристрою. Виштовхувачі в процесі обертання періодично входять в кільцеві щілини і видаляють з них застрягли в щілинах негабарити.

Виштовхувачі виконані з пружинної сталі різного діаметру і з урахуванням умови, що їх діаметр не перевищує 0,5 відстані між елементами (6, 7, 9) очисного органу, в яких можуть застрягати негабарити в процесі очищення від них рідкого середовища. Використання пружинного дроту забезпечує можливість їх використання при мінімальній відстані між дисками 6, 7 і нижнім диском 7 і кільцевим бортом 9.

В щілинах можуть застрягати негабарити, що мають клиноподібну форму або форму еліпса. Зазначені негабарити видаляються виштовхувачами, які рухаються назустріч застряглим в щілинах негабаритам. Виштовхувачі також ефективно видаляють з щілин негабарити зі змінною формою, які при попаданні в щілини приймають форму видовженого клина або перекривають ділянку кільцевої щілини.

Використання виштовхувачів з пружинного дроту забезпечує можливість їх використання в кільцевих щілинах шириною навіть 2 мм. Це важливо у випадках, коли в кільцевій щілині одне кільце рухливе, а друге нерухоме (наприклад, нижнє плоске кільце 7 з хрестовиною і кільцевий борт 9 збірного бункера 10), коли сила виштовхування діє на негабарит тільки з боку рухомого кільця.

Таким чином, запропонований очисний пристрій порівняно з прототипом розширює область його використання і забезпечує якість очищення, так як дозволяє видаляти з щілин (простору між дисками), негабарити постійної та змінної форми, а також плоскі негабарити, що перекривають ширину кільця. Це забезпечується за рахунок використання очисного органу з виштовхувачами, виконаними з пружинного дроту, що обертаються в протилежному напрямку порівняно з обертанням плоских кілець.

Висновки. Розширюється область використання очисного пристрою, забезпечується можливість видалення з рідкого середовища, що спрямовується в контрольновимірвальні прилади, негабаритів зі змінною формою, здійснюється очищення рідкого середовища від негабаритів і за рахунок її відцентрових потоків, що рухаються по поверхні плоских дисків, що контактують з рідким середовищем, і за рахунок впливу виштовхувачів, що рухаються в кільцевих щілинах в протилежних з ними напрямками. Запропонований пристрій може бути використаний і для обробки значної кількості рідини, наприклад для попереднього очищення виробничих стоків, що містять волокнисті забруднення або забруднення у вигляді пластівців. Наприклад, лінії по виготовленню паперової продукції, системи моніторингу міських стоків, та інші.

Література

1. А.с. 1080830, МПК В 01 D 21/26. Центробежное очистное устройство [Текст] / Дубовец А.Н., Скипенко М.И., Фрейди П.Г., Буряков С.Ф. ; заявл. 12.01.81 ; опубл. 23.03.84, Бюл. № 11.

2. А.с. 334521, МПК (2006) В 01 D 21/26. Устройство для очистки жидких технологических сред перед измерительными приборами [Текст] / Гайденко М.А., Дубовец А.Н. ; заявл. 04.02.08 ; опубл. 25.06.08, Бюл. № 2.

Bibliography (transliterated)

1. A.s. 1080830, MPK V 01 D 21/26. Tsentrobezhnoe ochistnoe ustroystvo [Tekst] / Dubovets A.N., Skipenko M.I., Freydi P.G., Buryakov S.F. ; zayavl. 12.01.81 ; opubl. 23.03.84, Byul. № 11.

2. A.s. 334521, МПК (2006) V 01 D 21/26. Ustroystvo dlya ochistki zhidkikh tekhnologicheskikh sred pered izmeritel'nymi priborami [Tekst] / Gaydenko M.A., Dubovets A.N. ; zayav. 04.02.08 ; opubl. 25.06.08, Byul. № 2.

УДК 628.1

Дубовець А.Н., Подустов М.А., Литвиненко Е.И., Пугановский О.В.

МОДЕРНИЗИРОВАННОЕ ОЧИСТИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Представлены результаты разработки, содержащие питательный и отводящий патрубки, приемную емкость, двигатель, вал, очистительный орган, выполненный из набора плоских колец с крестовиной, установленных на валу двигателя параллельно друг другу на расстоянии, величина, которого определяется калиброванными шайбами с квадратным отверстием. Ширина колец определяется по формуле $b = (0,30-0,35)R$. Сборный цилиндрический бункер с неподвижным горизонтальным бортом, отличается тем, что на верхней крышке двигателя установлена неподвижная ось, а на боковой закреплён очистительный орган. Который состоит из блока вращения, вала и выталкивателей, выполненных из пружинной проволоки, при этом вал двигателя, ось и вал блока вращения кинематически связаны посредством шестерен, а выталкиватели закреплены на валу вращения блока так, что их максимальный вход в кольцевые щели, образованные подвижными и неподвижными элементами очистного органа, выбирается в соответствии с условием $\ell = (0,6-0,7)b$, где ℓ – максимальный вход выталкивателей в процессе их вращения кольцевые щели очистного органа, b – ширина плоского кольца.

Dubovets O.M., Podustov M.O., Litvinenko E.I., Puhanovskij O.V.

UPGRADED CLEANING DEVICE

The results of the development, containing nourishing and outlet pipes, the receiving capacity, motor shaft, cleansing the body is made of a set of flat rings with the crossbar installed on the motor shaft parallel to each other at a distance, the value of which is determined by calibrated washers with square hole and the width rings given by $b = (0,30-0,35)R$ and collective cylinder tank with a fixed horizontal board, characterized in that the top cover of the engine installed fixed axis, and on his side secured purifying body consisting of block rotation shaft and ejector made of spring wire, with the motor shaft, the shaft axis and rotation unit cinematically connected by gears and ejector fixed to the shaft rotation unit so that their maximum input into annular gap formed by movable and immovable elements of cleansing the body, selected in accordance with the condition $\ell = (0,6-0,7)b$, where ℓ – maximum input ejector during their rotation annular gap clearing agency, b – width of a flat ring.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;
- ✓ теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);
- ✓ применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;
- ✓ тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;
- ✓ электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;
- ✓ экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,

а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до 20 числа последнего месяца предыдущего квартала. Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должен прилагаться диск CD-R или CD-RW со статьей, набранной в редакторе текстов **MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.**

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

Размер бумаги А4 (210×297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:

- непосредственно под верхней границей слева **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов;
- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается название статьи;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ДСТУ;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

РЕДКОЛЛЕГИИ

Украина, 61002,
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,
секретарю редколлегии Горбунову К.А.
Тел. (057) 707-69-58.
(057) 707-61-99
Email: gor.kona2016@gmail.com

СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ С ПРАВИЛАМИ,

РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА
В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ**

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 22786