

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

1'2021

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.
Свідоцтво перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)

Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

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

Технічний редактор

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц., професор НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ".

В. С. Вєдь, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ІППА НТУ "ХПІ"

В. П. Шаповров, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ХТПЕ НТУ "ХПІ"

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"

П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. АУТС НТУ "ХПІ"

Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ"

А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ТЕТ НТУ "ХПІ"

Ю. Б. Данилов, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ".

О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил ім. І.Кожедуба

В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ ХНУМГ

П. О. Капустенко, канд.техн. наук, професор, акад. Академії будівництва України

Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus egyetem, Budapest, Hungary

Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет технологій

Девид Дж. Кукулька, PhD, професор, Державний університет Нью-Йоркського коледжу у Буффало, США

Й. Клемеш, PhD, DSc (Hon), ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина), та ун-та Манчестера (Великобританія)

Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, університет Падерборна, Німеччина

Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато, Мексика

Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center - SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка

Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд, Нова Зеландія

П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно (Чеська республіка)

Панос Сеферліс, PhD., проф., університет Арістотеля, Салоніки, Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyanskyi, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

V. P. Shaporev, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

Yu. B. Danilov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv Air Force University

V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov National University of Municipal Economy named after O.M. Beketova

P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"

Ferenc Friedler, PhD, professor,

Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary

Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi Malaysia,

David J. Kukulka, PhD., professor, State University of New York College at Buffalo, USA

Jiří Jaromír Klemesš, PhD., professor, DSc (Hon) of the University of Pannonia (Veszprem, Hungary) and the University of Manchester (Great Britain)

Eugen Kenig, prof., dr.-ing., University of Paderborn, Germany

Martin Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico

Petar Sabev Varbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic

Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New Zealand

Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute BRNO University of Technology, Czech Republic

Panos Seferlis, PhD., professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Кошельнік О. В., Гойсан С. Б.

Перспективні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей	3
--	---

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Соловей В. М., Горбунов К. О., Верещак В. О., Горбунова О. В.

Дослідження процесів зовнішнього масопереносу при адсорбції з розчинів у апараті з перемішуванням.....	11
---	----

Андреев О. В., Загребельна Л. І., Кобець О. В.

Перерахунок характеристик відцентрових насосів на в'язкі рідини.....	21
--	----

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Павлова В. Г., Кошельнік О. В., Пугачова Т. М., Круглякова О. В.,
Долобовська О. В.*

Вплив процесів паро- та кристалоутворення на теплообмін в плівкових випарних апаратах	32
--	----

Руденко Н. О., Леценко С. А., Коваленко Ю. І.

Каталітичні властивості покриття Ni–V в процесі виділення водню.....	41
--	----

Шевченко К. В., Григоров А. Б., Сінкевич І. В.

Визначення корозійного впливу на метал палива, отриманого з вторинної полімерної сировини.....	48
---	----

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Перевалов Л. І., Голодняк В. О., Демидов І. М., Тимченко В. К., Півень О. М.,
Мольченко С. М.*

Теоретичні та експериментальні дослідження процесу низькотемпературного обрушування високоолійного соняшнику в умовах дії відцентрового поля.....	57
---	----

<i>Сторінка редколегії.....</i>	67
---------------------------------	----

Затверджено Вченою радою НТУ «ХП» (протокол № 2 від 26.02.2021 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХП», 2021. – № 1. – 68 с.

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

© Національний технічний університет «ХП», 2021

Кошельник О.В.^{1,2}, к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б.², аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Ключові слова: скловарна піч, утилізація теплоти димових газів, регенеративні теплообмінники, насадка регенераторів, ефективність.

Вступ. На початку ХІХ століття сформувався новий етап в розвитку скловаріння, внаслідок розробки і впровадження принципу регенерації теплоти димових газів німецьким інженером Фрідріхом Сіменсом. При детальному дослідженні було виявлено, що така схема дозволяла нагріти необхідну кількість холодного повітря гарячими димовими газами, що зменшувало витрату палива в печі та значно підвищувала температуру в ній [1, 2]. Первинне використання регенераторів в печах було здійснене на горшкових печах, а пізніше – у печах ванного типу. Ванні регенеративні печі виявились більш економічними аніж горшкові не тільки із-за кращого використання палива, а й внаслідок безперервного виробництва скла. Проте така конструкція також має свої недоліки [3, 4].

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Вчені-теплотехніки загалом працювали над покращенням конструкції насадки регенераторів печі, більшість із них досліджені, оптимізовані та знайшли своє використання на практиці. В більшості ці рішення стосуються збільшення або зміни площі та форм насадок, що в деяких реальних установках неможливо здійснити, а питання по збільшенні ефективності регенератора скловарної печі без зміни габаритних розмірів залишається досить актуальним [5, 6]. Тому вирішення даного питання може суттєво збільшити ефективність роботи печі в цілому.

Викладення основної частини дослідження. Регенераторами називають спеціальні теплообмінні камери, всередині яких знаходиться вогнетривка теплообмінна насадка. Головна конструктивна відмінність регенератора від рекуператора полягає у тому, що теплообмін відбувається не через розділову стінку, а через спеціальну насадку. За деякий період часу до насадки надходить одна із двох середовищ – те, що нагрівається, або ж те, що гріє. В залежності від типу печі, її конструкції, виду палива, продуктивності та інших критерії конструктивно розрізняють вертикальні та горизонтальні регенератори. Вертикальні регенератори отримали найбільше використання в силу меншого аеродинамічного опору та відносно невеликого забруднення насадки (рис. 1) [4].

Насадки регенераторів зазвичай виконують із вогнетривких матеріалів, переважно шамоту, високоглиноземистої та термостійкої магнезитової цегли. При виробництві окремих видів скла, вибір вогнетривів здійснюється, виходячи з циклічності використання, а також конкретних робочих температур. Так, при виробництві боросилікатного скла, прийнято застосовувати корунд-цирконієві та циркономулітові матеріали. Також інколи можна зустріти спеціальні види вогнетривких матеріалів, які розроблені для регенераторів промислових печей, наприклад високотермостійкі періклазові, періклазоцирконієві та перікло-форстерито-цирконієві вогнетриви, що використовуються при температурах 1400–1500 °С та зберігають свої властивості протягом 6–8 років [7, 8].

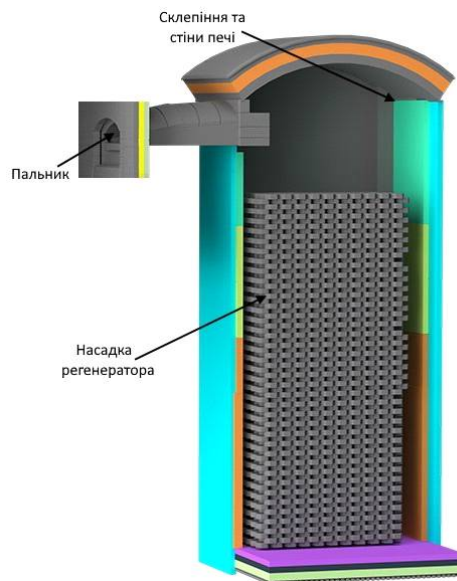


Рисунок 1 – Загальний вид вертикального регенеративного теплообмінника

Насадки регенераторів як правило намагаються викладати з максимальною поверхнею нагріву, що дозволяє отримати найефективніший теплообмін між газами та вогнетривами. В той й же час слід урахувувати опір потоку газів, що проходять по каналах, теплові та міцносні властивості вогнетривів, а також тип насадки регенератора. На рисунку 2 зображені основні типи насадок регенераторів ванних скловарних печей: Каупера із суцільними каналами (а); незміщена Сіменса з рядами що, чергуються (б); зміщена Сіменса з рядами що, чергуються (в); Ліхте (г, д); з розташуванням цегли, що чергуються (е) [5, 9].

Насадка Каупера виконується таким чином, що цегла утворює суцільні вертикальні канали без мертвого простору між потоком і цеглинами. Окрім позитивних якостей, наприклад, стійкості конструкції а також простоти очищення, основними недоліками є невелика поверхня нагріву (відношення m^2 поверхні, що нагріває, до m^3 насадки), невеликий коефіцієнт теплопереноса. Найбільш оптимальним для підвищення ефективності даних насадок буде використання цегли спеціальної форми в каналах для забезпечення турбулізації потоку, а також застосування цеглини з невеликою товщиною, оскільки із зменшенням товщини збільшується поверхня теплообміну.

Насадка Сіменса викладається в двох варіантах – із зміщеними або незміщеними в шаховому порядку рядами. Насадка із зміщеними рядами має кращу теплопередачу, однак більш схильна до забруднення аніж насадка з незміщеною конструкцією. Найбільш розповсюдженою є насадка із горизонтальними рядами, що чергуються, оскільки при такому виконанні вона має більшу поверхню теплообміну за умов використання стандартної цегли та ширини каналу [3].

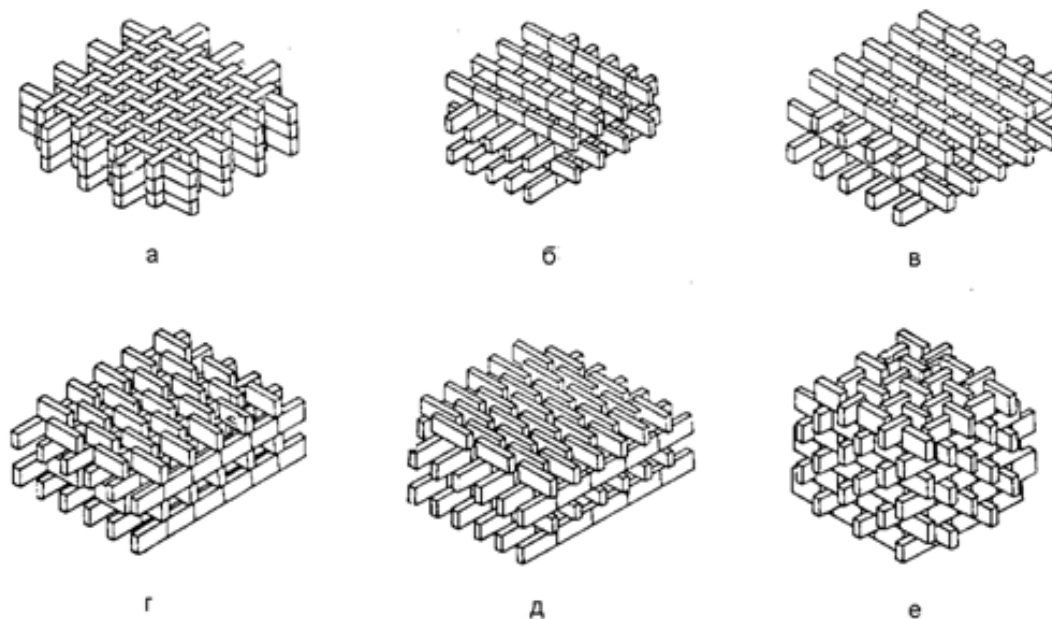


Рисунок 2 – Основні типи насадок регенераторів

Насадка Ліхте має найбільшу ефективність в порівнянні з іншим типами насадок. Дана конструкція виконується з рядами, що чергуються, та цеглинами у розбіг. Перевагою такого виконання є те, що торцеві поверхні цеглин залишаються відкритими, при цьому збільшується площа нагріву за рахунок вертикальних площин. Гази, що проходять один рад, міняють свій напрямок і швидкість, в насадці ж із суцільними каналами ці параметри залишаються без змін.

Насадка з рядами цеглин, що чергуються, або ж комбіновані насадки знайшли своє застосування в печах великої потужності. Такі насадки можуть викладатись як комбінація насадки Каупера (див. рис. 2, а) і насадки Сіменса (див. рис. 2, б, в). Також широке поширення в останній час отримали корзинкові насадки та хрестоподібні насадки з плавнелитих формових елементів [5].

Для всіх названих типів насадок притаманні спільні властивості, які характеризують ефективність та доцільність використання конкретного їх типу:

- прохідний перетин (%), тобто характеристика аеродинамічного опору потоку газів;
- еквівалентна товщина цегли насадки;
- товщина елемента, тобто характеристика стійкості матеріалу насадки;

- поверхня теплообміну (m^2/m^3 об'єму регенеративної камери), тобто характеристика степені заповнення простору камери.

Розглянувши всі аспекти виконання, використання та переваги основних видів насадок, стає зрозумілим, що для збільшення ефективності регенератора скловарної печі, слід розглядати перспективні варіанти виконання. Одним із таких варіантів виконання регенеративної насадки можна розглядати так звані гібридні матеріали на основі «сольової» кераміки [10–12]. В даний час здійснюються дослідження та розвивається виробництво таких насадок із використанням сульфату барію та сульфату натрію ($BaSO_4$, Na_2SO_4) в поєднанні із вогнетривами на основі MgO та SiO_2 (магнезитові, періклазові та ін.) Перші спроби виконання насадок даного типу показали високу стійкість при різноманітних циклічних навантаженнях. Основною перевагою такої насадки є дія прихованої теплоти, що обумовлюється фазовим переходом компонента (солі), тобто така насадка буде отримувати більше теплоти ніж проста насадка таких же габаритів на величину прихованої теплоти фазового переходу солі. В роботі [10] було розглянуто один із основних недоліків та обмежень щодо використання плавких вставок в регенераторах:

- менша стійкість конструкції, за рахунок внутрішніх пустот, що заповнені матеріалом з фазовим переходом;
- ретельний підбір вогнетривів із урахуванням стійкості до агресивних летучих компонентів;
- підбір плавкого матеріалу з добрими показниками «залишкового» тепла і зміни об'єму та щільності під час процесу «плавлення-кристалізація».

Тому ефективним буде використання насадок з таких матеріалів в зонах найбільших перепадів температур, тобто у верхній та нижній частинах регенератора.

Висновки. Таким чином, проаналізувавши сучасні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей, можна зробити наступні висновки. Ефективність роботи регенераторів майже неможливо підвищити за рахунок заміни одного типу насадок на іншу без значного збільшення розмірів теплообмінника. Найбільш ефективними типами насадок на сьогодні є насадка Ліхте з вогнетривкої цегли та насадка корзинового типу, виконана з плавнелитих формових елементів. Для подальшого підвищення теплоакумуючих властивостей насадок пропонується використання цегли з плавкими вставками з «сольових» матеріалів, що додатково дозволить використовувати теплоту фазового переходу. Але для забезпечення надійності роботи регенераторів з такими насадками необхідно проведення додаткових досліджень процесів теплообміну та стійкості акумулюючи елементів.

Література

1. Волгина Ю.М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов / Ю.М. Волгина. – М. : Стройиздат, 1982. – 276 с.
2. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи / Д.Б. Гинзбург. – М : Стройиздат, 1967. – 340 с.

3. Булавин И.А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов / И.А. Макаров, А.Я. Рапопорт, В.К. Хохлов. – М. : Стройиздат, 1982. – 243 с.
4. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А.С. Козлов. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 143 с.
5. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве : монография / Товажнянский Л.Л., Кошельник В.М., Соловей В.В., Кошельник А.В. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
6. Кошельник А.В. Підвищення енергоефективності регенераторів з нерухомою насадкою полум'яних скловарних печей / А.В. Кошельник, М.Н. Шапранова. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 63 (969). – Тем. вип. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – С. 54–66.
7. Троянкин Ю.А., Кузьмина И.М. Оптимизация насадки регенераторов ваннных стекловаренных печей / Ю.А.Троянкин, И.М. Кузьмина // Стекло и керамика. – 1997. – № 9. – С. 12–14.
8. Современные строительные материалы. Строительное и техническое стекло (аналитический обзор) / Матвеев Г.М., Миронов В.В., Раскина Э.М., Тарасевич К.А. // Стекло и керамика. – 1998. – № 8. – С. 7–10.
9. Кошельник А.В. Разработка и анализ нейросети для прогнозирования параметров эффективности насадки регенератора стекловаренной печи / А.В. Кошельник, А.А. Мигура // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/8 (78). С. 29–33.
10. Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozessen, insbesondere Industrieoffen // Workshop in Duesseldorf. – Karlsruhe: Fraunhofer-Institut fuer Systemtechnik und Innovationforschung, 1996. – P. 82–97.
11. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb / H. Brunklaus. – Essen : Vulkan-Verlag, 1994. – 800 p.
12. Trier W. Glasschmelzofen. Konstruktion und Betriebsverhalten / W. Trier. – Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer Verlag, 1984. – 338 p.

Bibliography (transliterated)

1. Volgina Yu.M. Teplotekhnicheskoye oborudovaniye stekol'nykh zavodov / Yu.M. Volgina. – М. : Sroyizdat, 1982. – 276 p.
2. Ginzburg D.B. Steklovarennyye pechi / P.B. Ginzburg. – М : Sroyizdat, 1967. – 340 p.
3. Bulavin I.A. Teplovyye protsessy v tekhnologii silikatnykh materialov / I.A. Makarov, A.Ya. Rapoport, V.K. Khokhlov. – М. : Sroyizdat, 1982. – 243 p.
4. Kozlov A.S. Teplotekhnika regenerativnykh steklovarennykh pechey / A.S. Kozlov. – М. : Legprombytizdat, 1990. – 143 p.
5. Integrirovannyye energosberegayushchiye teplotekhnologii v stekol'nom proizvodstve : monografiya / Tovazhnyanskyu L.L., Koshelnik V.M., Solovey V.V., Koshelnik A.V. – Kharkov : NTU «KhPI», 2008. – 628 p.

6. Koshelnik A.V. Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti reheneratoriv z nerukhomoyu nasadkoyu polum'yanykh sklovarnykh pechey / A.V. Koshelnik, M.N. Shapranova. – Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2012.

7. Troyankin Yu.A., Kuz'mina I.M. Optimizatsiya nasadki regeneratorev vannykh steklovarenykh pechey / Yu. A.Troyankin, I.M. Kuzmina // Steklo i keramika. – 1997. – № 9. – P. 12–14.

8. Sovremennyye stroitelnyye materialy. Stroitelnoye i tekhnicheskoye steklo (analiticheskiy obzor) / Matveyev G.M., Mironov V.V., Raskina E.M., Tarasevich K.A. // Steklo i keramika. – 1998.– № 8. – P. 7–10.

9. Koshelnik A.V. Razrabotka i analiz neyroseti dlya prognozirovaniya parametrov effektivnosti nasadki regeneratorev steklovarennoy pechi / A.V. Koshelnik, A.A. Migura // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2015. – № 6/8 (78). P. 29–33.

10. Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozessen, insbesondere Industrieoffen // Workshop in Duesseldorf. – Karlsruhe: Fraunhofer-Institut fuer Systemtechnik und Innovationforschung, 1996. – P. 82–97.

11. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb / H. Brunklaus. – Essen : Vulkan-Verlag, 1994. – 800 p.

12. Trier W. Glasschmelzofen. Konstruktion und Betriebsverhalten / W. Trier. – Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer Verlag, 1984. – 338 p.

УДК 666.1.031.2: 620.97

Кошельнік О.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

У скловарних печах одним із способів підвищення їхньої енергетичної ефективності є використання теплового потенціалу димових газів, що відходять, в утилізаційних теплообмінних пристроях. Величина даних втрат становить 25–40 % від загальної кількості тепла, що надійшло в піч. Вона залежить від таких факторів, як вид палива, конструкція печі та пальникових пристроїв, вид продукції, що виготовляється. Для печей великої потужності найбільш ефективним вважається використання регенеративних теплообмінників з різними видами теплоакумуючої насадки. Проаналізовано існуючі типи насадок регенераторів: насадки Каупера, Сименса двох видів, Ліхте і комбіновані насадки. Ці насадки, що викладають зі стандартної вогнетривкої цегли, на сьогоднішній час уже досить досліджені, успішно впроваджені й широко використовуються в скловарних печах різної конструкції. Також останнім часом набули широкого застосування корзинові насадки й хрестоподібні насадки із плавнелитих формових вогнетривких матеріалів. Подальше збільшення теплової ефективності регенеративних теплообмінників шляхом заміни насадок неможливо без збільшення їхніх габаритів, що не завжди можливо при реконструкції діючих печей. Тому перспективним тут є використання теплоакумуючих елементів з фазовим переходом, де в якості плавкої вста-

вки застосовуються солі металів і їхні суміші. Вони можуть акумулювати додаткову кількість теплоти за рахунок використання теплоти фазового переходу, що дозволить без зміни габаритних і режимних параметрів теплообмінника значно збільшити його теплову потужність. Однак для широкого застосування таких насадок необхідне проведення додаткових досліджень, пов'язаних з моделюванням складних нестационарних теплообмінних процесів у регенераторах і підбора відповідних матеріалів, що задовольняють умовам експлуатації регенеративних теплообмінників скловарних печей.

Ключові слова: скловарна піч, утилізація теплоти димових газів, регенеративні теплообмінники, насадка регенераторів, ефективність.

Кошельник А.В., к.техн.н., доцент, Гойсан С.Б., аспірант

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ НАСАДОК РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧЕЙ

В стекловаренных печах одним из способов повышения их энергетической эффективности служит использования теплового потенциала отходящих дымовых газов в утилизационных теплообменных устройствах. Величина данных потерь составляет 25–40 % от общего количества тепла, поступившего в печь. Она зависит от таких факторов, как вид топлива, конструкция печи и горелочных устройств, вид изготавливаемой продукции. Для печей большой мощности наиболее эффективным считается использование регенеративных теплообменников с различными видами теплоаккумулирующей насадки. Проанализированы существующие типы насадок регенераторов: насадки Каупера, Сименса двух видов, Лихте и комбинированные насадки. Эти насадки, выкладываемые из стандартного огнеупорного кирпича, на сегодняшнее время уже достаточно исследованы, успешно внедрены и широко используются в стекловаренных печах различной конструкции. Также в последнее время получили широкое применение корзиночные насадки и крестообразные насадки из плавнелитых формовых огнеупорных материалов. Дальнейшее увеличение тепловой эффективности регенеративных теплообменников путем замены насадок невозможно без увеличения их габаритов, что не всегда возможно при реконструкции действующих печей. Поэтому перспективным здесь является использование теплоаккумулирующих элементы с фазовым переходом, где в качестве плавкой вставки применяются соли металлов и их смеси. Они могут аккумулировать дополнительное количество теплоты за счет использования теплоты фазового перехода, что позволит без изменения габаритных и режимных параметров теплообменника значительно увеличить его тепловую мощность. Однако для широкого применения таких насадок необходимо проведение дополнительных исследований, связанных с моделированием сложных нестационарных теплообменных процессов в регенераторах и подбора соответствующих материалов, удовлетворяющим условиям эксплуатации регенеративных теплообменников стекловаренных печей.

Ключевые слова: стекловаренная печь, утилизация теплоты дымовых газов, регенеративные теплообменники, насадки регенераторов, эффективность.

Koshelnik O., Hoisan S.

ADVANCED TYPES OF CHECKERWORK OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS FOR GLASS FURNACES

One of the ways to increase glass furnaces energy efficiency is to apply heat exchangers for flue gases thermal potential utilization.

Flue gases losses is up to 25-40 % of the total amount of heat supplied in the furnace. These losses are influenced by such factors as fuel type, furnace and burners design and manufactured product type.

Regenerative heat exchangers with various types of heat storage packing is more efficient for high-power furnaces.

Such types of regenerator checkerwork as Cowper checkerwork, two types of Siemens checkerwork, Lichte checkerwork and combined checkerwork have already been sufficiently researched, successfully applied and widely used for glass furnaces of various designs. All of them are made of standard refractory bricks. Basket checkerwork and cruciform checkerwork that are made of fused-cast molded refractory materials have been widely used recently as well.

Further improvement of regenerative heat exchangers thermal efficiency only by replacing the checkerwork does not seem possible unless their size being increased. But this enlarging is not always realizable during the modernization of existing furnaces.

From this point of view heat storage elements with a phase transition, where metal salts and their mixtures are used as a fusible agent look promising for glass furnaces.

These elements can accumulate additional amount of heat due to phase transition, which allows to increase significantly heat exchanger thermal rating without its size and operating conditions changing.

However, it is necessary to carry out additional studies of this type of checkerwork dealing with analysis of complex unsteady heat exchange processes in regenerators and selection of appropriate materials that satisfy the operating conditions of regenerative heat exchangers so that the checkerwork can be widely used for glass furnaces.

Keywords: glass furnace, utilization of flue gas heat, regenerative heat exchangers, regenerator packing, efficiency.

Соловей В.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор,
Верещак В.О., студент, Горбунова О.В., ст.викладач

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗОВНІШНЬОГО МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ АДСОРБЦІЇ З РОЗЧИНІВ У АПАРАТІ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

Ключові слова: масоперенос, адсорбція, перемішування, турбулентність, енергія, дисипація, критеріальне рівняння.

Процеси масопереносу в системі рідина–тверде тіло багато в чому залежать від гідродинамічного режиму, який найчастіше є турбулентним.

Для кількісного опису турбулентного руху вводиться поняття турбулентного вихору (турбулентна пульсація швидкості), який характеризується швидкістю u_λ , масштабом λ (хвильовим числом $k = 2\pi/\lambda$) та кінетичною енергією $E(k, t)$.

Великомасштабні рухи масштабу L (інтегральний масштаб турбулентності) містять майже всю кінетичну енергію, яка отримується від пристрою, що перемішує, завдяки інерційній взаємодії. Великі вихори породжують все дрібніші і дрібніші вихори, здійснюючи конвективне перенесення енергії між ними. У вихорах, масштаб яких менший за внутрішній мікромасштаб турбулентності λ_0 , відбувається як подальше перенесення енергії до дрібніших вихорів, так і дисипація енергії, і перетворення її на тепло за рахунок дії в'язких сил. Вихори даного масштабу формують область універсальної рівноваги, яка поділяється на інерційну конвективну підобласть і підобласть в'язкої дисипації [1].

Згідно з теорією універсальної рівноваги Колгоморова А.М. [2] найдрібніші масштаби мають універсальну однорідну структуру (локальну ізотропію), яка статистично не залежить від середнього потоку великих масштабів. Ця незалежність передбачає, що вихори, які містять майже усю енергію турбулентності, знаходяться у інтервалі хвильових чисел, який відділений широким проміжком від інтервалу в'язкої дисипації енергії.

Відправною точкою аналізу області універсальної рівноваги є рівняння Кармана-Хауерта [1]

$$\frac{\partial E(k, t)}{\partial t} = F(k, t) - 2\nu k^2 E(k, t) \quad (1)$$

Ліва частина являє собою зміну повної кінетичної енергії турбулентності; $F(k, t)$ – спектральна функція перенесення, що визначає інерційне перенесення енергії між вихорами; $E(k, t)$ – функція енергетичного спектру; останній доданок – спектральна щільність енергії, що дисипує у вихорах із хвильовим числом k .

Бетчелор показав [3], що зменшення енергії під дією в'язкості на верхньому кінці інтервалу хвильових чисел універсальної області рівноваги дорівнює притоку енергії

в результаті інерційного перенесення на нижньому кінці цього інтервалу. Зменшення та збільшення енергії відбувається зі швидкістю

$$\varepsilon = 2\nu \int_0^{\infty} k^2 E(k) dk, \quad (2)$$

де ε – енергія, що дисипує в одиниці маси рідини

У підобласті в'язкої дисипації за високих хвильових числах існують вихори, які визначаються енергією дисипації та в'язкістю, розміром η (мікромасштаб Колгоровова), який, виходячи з міркувань розмірності, дорівнює

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

Для інерційної підобласті, коли $L > \lambda > \eta$ спектральна функція [3]

$$E(k, t) = c_1 \varepsilon^{2/3} k^{-(5/3)}, \quad (4)$$

де константа $c_1 = 1,3$ [4].

Використовуючи рівняння (4) Бетчелор отримав вираз для середньоквадратичної різниці швидкостей у двох сусідніх точках x і $x + \lambda$

$$|u(x + \lambda, t) - u(x, t)|^2 = u_{\lambda}^2 = \beta(\varepsilon \lambda)^{2/3}, \quad (5)$$

де константа $\beta = 4,6c_1$.

Рівняння (5) є аналітичним виразом швидкості вихору, яка характеризується її зміною на відстані порядку λ [6].

Для вихорів у підобласті в'язкої дисипації для $\lambda < \eta$ Обухов О.М. і Яглом А.М. [5] отримали рівняння

$$E(k, t) = c_2 \varepsilon \lambda^3. \quad (6)$$

З рівняння (6) для підобласті в'язкої дисипації випливає, що квадрат швидкості вихору дорівнює [7]

$$u_{\lambda}^2 = \gamma \frac{\varepsilon}{\nu} \lambda^2, \quad (7)$$

де константа $\gamma = 0,5c_2$.

Експериментальне вимірювання поздовжньої і поперечної середньоквадратичної пульсаційної швидкості $\sqrt{\bar{u}_l^2}$ і $\sqrt{\bar{u}_n^2}$ в апараті з мішалкою показали, що турбулентність не є анізотропною [8,12]. Однак вимірювання спектральної функції енергії турбулентності показали, що в області високих хвильових чисел (частота турбулентних пульсацій $10^2 \div 10^3 \text{ c}^{-1}$) виконується так званий спектральний закон " $-5/3$ " Колмогорова А.М. Отже, теорія локальної ізотропії може бути використана, адже має місце інерційна підобласть (4). Інтегрована за об'ємом апарату величина локальної енергії дисипації узгоджується з підвідною потужністю мішалки до одиниці маси рідини. Це означає, що майже вся енергія від мішалки дисипує в мікромасштабних вихорах [7]. Тоді

$$\varepsilon \approx \frac{N}{\rho V_{an}}; \quad N = K_n \rho n^3 d_m^5, \quad (8)$$

де K_n – критерій потужності; n – частота обертання мішалки, об/с; d_m – діаметр мішалки, м; V_{an} – об'єм апарату, м^3 .

Можна припустити, що приблизно 10% енергії дисипує за рахунок тертя рідини о стінки апарату [11].

Масоперенесення в системі рідина–тверде тіло зумовлене рухом рідини відносно часток. Локальний відносний рух створюється вихорами, які частково захоплюють частки. Вихори великого масштабу захоплюють частки разом із прилеглими до них шарами рідини, переміщуючи їх як одне ціле і продукуючи нульову відносні швидкість. Найменш масштабні вихори, значно менші за частки, будуть незначно впливати на створення відносного руху [10].

Для кількісної оцінки величини масштабу вихорів, які створюють максимальну відносні швидкість, скористаємося рівнянням Чена [2]

$$\rho_p V \frac{du_p}{dt} = k_f \rho S v^2 + \rho V \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} \rho V \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) + F_e, \quad (9)$$

де k_f – коефіцієнт тертя; ρ_p – щільність часток; ρ – щільність рідини; V – об'єм частинки; u_p – швидкість частинки; u – швидкість рідини в околицях частинки; S – поперечний переріз частинки; $v = u - u_p$ – швидкість рідини відносно частинки; F_e – зовнішня потенційна сила (сила гравітації).

Член у лівій частині рівняння (9) являє силу, необхідну для прискорення частинки. Перший член у правій частині – сила опору, якого зазнає частинка під час руху з відносною швидкістю v . Другий член – сила, яка діяла б на частинку, якщо б вона повністю захопилася рідиною при $u = u_p$. Третій член характеризує силу, яка призводить до прискорення удаваної маси частинки відносно оточуючої рідини.

Якщо локальну швидкість виразити як швидкість вихору масштабу λ , то тоді u і прискорення $\frac{du}{dt}$ можна замінити на u_λ і $\frac{du_\lambda}{dt}$. Виконуючи цю заміну і визначаючи відносну швидкість $v = u_\lambda - u_p$ і додаючи до лівої та правої частини рівняння доданок $\rho_p V \frac{du_\lambda}{dt}$ отримуємо

$$\rho_p V \frac{dv}{dt} = (\rho_p - \rho) V \frac{du_\lambda}{dt} - k_f \rho S v^2 - \frac{\rho V}{2} \frac{dv}{dt}. \quad (10)$$

Руху вихору масштабу λ , що відбувається зі швидкістю u_λ , відповідає характерний період T_λ [6]

$$T_\lambda = \frac{\lambda}{u_\lambda}. \quad (11)$$

Тоді прискорення вихору можна представити

$$\frac{du_\lambda}{dt} \cong \frac{u_\lambda}{T_\lambda} = \frac{u_\lambda^2}{\lambda}. \quad (12)$$

Використовуючи рівняння (5) для u_λ

$$u_\lambda = \sqrt{\beta} (\varepsilon \lambda)^{1/3}. \quad (13)$$

і підставляючи рівняння (13) у (12) отримаємо

$$\frac{du_\lambda}{dt} = \frac{\beta \varepsilon^{2/3}}{\lambda^{1/3}}. \quad (14)$$

За аналогією з рівнянням (12) відносно прискорення можна представити у вигляді

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v^2}{\lambda}. \quad (15)$$

Підставляючи рівняння (14) і (15) у (10) та вирішуючи відносно v отримуємо

$$v = \frac{\sqrt{\beta} [(\rho_p - \rho)V]^{1/2} \varepsilon^{1/3} \lambda^{1/3}}{\left[(\rho_p + \frac{\rho}{2})V + k_f \rho S \lambda \right]^{1/2}}. \quad (16)$$

Використовуючи рівняння (16), можна визначити масштаб вихорів, які забезпечують максимальну відносну швидкість. Для цього диференціюємо (16) за λ і прирівнюючи $dv/d\lambda = 0$ знаходимо

$$\lambda_{v_{\max}} = \frac{2}{k_f} \left(\frac{\rho_p + \frac{\rho}{2}}{\rho} \right) \frac{V}{S}. \quad (17)$$

Якщо взяти $\rho_p \approx \rho$ (що часто виконується за рідинної адсорбції), то $\left(\rho_p + \frac{\rho}{2} \right) / \rho \approx \frac{3}{2}$ і тому

$$\lambda_{v_{\max}} \approx \frac{3}{k_f} \frac{V}{S}. \quad (18)$$

Для сфери $\frac{V}{S} = \frac{2d}{3}$ и так як $k_f \approx 1$, то $\lambda_{v_{\max}} \approx 2d$.

Підстановка рівняння (17) у (16) дає максимум відносної швидкості

$$v_{\max} = \frac{\sqrt{\beta}}{3^{1/2}} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p + \frac{\rho}{2}} \right) \varepsilon^{1/3} \lambda_{v_{\max}}^{1/3}. \quad (19)$$

Використовуючи рівняння (19) і (13) можна порівняти максимум відносної швидкості і відповідну швидкість вихору

$$\frac{v_{\max}}{u_{\lambda_{\max}}} = \frac{1}{3^{1/2}} \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p + \frac{\rho}{2}} \right)^{1/2} = 0,3 \text{ при } \rho_p = 1300 \text{ кг/м}^3 \text{ і } \rho = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

Під час експериментального дослідження масоперенесення до часток, що зафіксовані у потоці рідини, Rens і Marshall отримали рівняння [11]

$$Nu' = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr'^{0,33}.$$

Взявши за основу цю залежність і використовуючи експериментальні дані з масоперенесенням у системі рідина–тверді частки ($d_p = 0,09 \div 1$ мм; $\rho_p = 1100 \div 5000$ кг/м³; $\varepsilon = 0,1 \div 0,5$ м²/с³) [9], було отримане критеріальне рівняння

$$Nu' = 2 + 0,45 Re_p^{0,5} Pr'^{0,35}, \quad (20)$$

де $Re_p = \frac{v_{max} d_p}{\nu}$; $Pr' = \frac{\nu}{D}$; $Nu' = \frac{\beta d_p}{D}$; D – коефіцієнт молекулярної дифузії.

Для випадку $d_p = 0,5$ мм; $\rho_p = 1300$ кг/м³; $\varepsilon = 0,2$ м²/с³; $Pr' = 1050$; $D = 10^{-9}$ м²/с; $\rho = 1000$ кг/м³; $\nu = \nu_{max}$ розрахунковий коефіцієнт масовіддачі за рівнянням (20) набув значення $\beta_c = 0,4 \cdot 10^{-4}$ м/с, що відрізняється від експериментального начення на 8%.

Для часток з розміром $d_p < \eta$ рівняння Чена набуває вигляду

$$\rho_p V \frac{du_p}{dt} = 3\pi\mu d_p (u - u_p) + \rho V \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} \rho V \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) + \frac{3}{2} d_p^2 \sqrt{\pi\rho\mu} \int_{t_0}^t \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) + F_e, \quad (21)$$

де четвертий член – або член Бассе враховує вплив відхилення течії від стаціонарного стану, третій і четвертий члени у правій частині рівняння (21) набувають важливого значення лише у тому випадку, коли щільність рідини порівнянна з щільністю частки або перевищує її [2]. Опускаючи ці члени і здійснюючи аналогічні перетворення як і раніше з рівнянням (10) отримаємо

$$\left(\rho_p + \frac{1}{2} \rho \right) V \frac{dv}{dt} = (\rho_p - \rho) V \frac{du_\lambda}{dt} - 3\pi\mu d_p v. \quad (22)$$

Прискорення $\frac{dv}{dt}$ у лівій частині значно менше ніж прискорення рідини $\frac{du_\lambda}{dt}$.

Тоді без врахування цього члена відносна швидкість рідини при $\lambda \approx d_p$ буде дорівнювати

$$v_{\lambda=d_p} \approx \frac{\gamma}{3\pi\mu} (\rho_p - \rho) V \frac{\varepsilon}{\nu}. \quad (23)$$

За тих самих вихідних даних, приймаючи $c_2 = 2,4$ [7]; $\gamma = 1,2$; $d_p = 0,04$ мм, $\eta = 0,05$ мм відносна швидкість за рівнянням (23) буде $v_{\lambda=d} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м/с. Тоді розрахун-

ковий коефіцієнт масовіддачі за рівнянням (20) набуває значення $\beta_c = 0,6 \cdot 10^{-4}$ м/с, що відрізняється від експериментального значення на 10%.

Література

1. Колгоморов А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемо жидкости при очень больших числах Рейнольдсах. ДАН СССР т. 30, №4, 1941 – С. 299–303.
2. Хинце И.О. Турбулентность ФМ. М. 1963. – 680 с.
3. Бэтчелор Дж. Теория однородной турбулентности, ИЛ, М. 1955. – 197 с.
4. Бетчелор Дж., Моффай Г., Сэффмен Ф. и др. Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. М.: МИР, 1984 – 501 с.
5. Обухов А.М., Яглом А.М. Микроструктура турбулентного потока // Прикл. матем. мех. 1951. Т. 15, № 1. С. 3–26.
6. Левин В.Г. Физико-химическая гидродинамика, М.: Физмат гиз, 1950, – 700 с.
7. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях, М.: Энергия, 1979. – 408 с.
8. Nagata S., Nishikawa M., Inoue A. Turbulence in non-buffed mixing vessel Journal of chemical Engineering of Japan, vol 8, No3, 1975 – p. 243–247.
9. Levics D.M., Glastonbury J.R. Particle-liquid hydrodynamics and mass transfer in a stirred vessel, Trans. Instu. Chem. Engrs., vol 50, 1972 – p. 132–145.
10. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. – М.:Химия, 1991. – 496 с.
11. Никольский Б.П. Справочник химика. 2-е изд. – М.: Химия, 1966. – 1072 с.
12. Шутеев В.Я., Смирнов В.Н., Соловей В.Н., Воловод В.Ф. Измерение параметров турбулентности в аппаратах с мешалкой лазерным анемометром. ТОХТ, т.14, №1, 1980.– С. 148–150.

Bibliography (transliterated)

1. Kolgomorov A.N. Lokal'naya struktura turbulentsnosti v neszhimaemo zhidkosti pri ochen' bol'shih chislah Rejnol'dsah. DAN SSSR t. 30, №4, 1941 – P. 299–303.
2. Hince I.O. Turbulentsnost' FM. M. 1963. – 680 p.
3. Betchelor Dzh. Teoriya odnorodnoj turbulentsnosti, IL, M. 1955. – 197 p.
4. Betchelor Dzh., Moffaj G., Seffmen F. i dr. Sovremennaya gidrodinamika. Uspekhi i problemy. M.: MIR, 1984 – 501 p.
5. Obuhov A.M., Yaglom A.M. Mikrostruktura turbulentsnogo potoka / Prikl. matem. mekh. 1951. T. 15, № 1. P. 3–26.
6. Levin V.G. Fiziko-himicheskaya gidrodinamika, M.: Fizmat giz, 1950. – 700 p.
7. Rejnol'ds A.Dzh. Turbulentsnye techeniya v inzhenernyh prilozheniyah, M.: Energiya, 1979. – 408 p.

8. Nagata S., Nishikawa M., Inoue A. Turbulence in non-buffed mixing vessel Journal of chemical Engineering of Japan, vol 8, No3, 1975 – p. 243–247.

9. Levics D.M., Glastonbury J.R. Particle-liquid hydrodynamics and mass transfer in a stirred vessel, Trans. Instu. Chem. Engrs., vol 50, 1972 – p. 132–145.

10. Dytnerskij YU.I. Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii: Posobie po proektirovaniyu/ G.S. Borisov, V.P. Brykov, YU.I. Dytnerskij i dr. Pod red. YU.I. Dytnerskogo, 2-e izd., pererab. i dopoln. – M.:Himiya, 1991. – 496 p.

11. Nikol'skij B.P. Spravochnik himika. 2-e izd. – M.: Himiya, 1966. – 1072 p.

12. SHuteev V.YA., Smirnov V.N., Solovej V.N., Volovod V.F. Izmerenie parametrov turbulentnosti v apparatah s meshalkoj lazernym anemometrom. ТОИТ, т.14, №1, 1980.– P. 148–150.

УДК 66.021

Соловей В.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор,
Верещак В.О., студент, Горбунова О.В., ст.викладач

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗОВНІШНЬОГО МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ АДСОРБЦІЇ З РОЗЧИНІВ У АПАРАТІ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

Вивчено спосіб транспортно-контрольованого масопереносу до частинок, підвишених в посудині з мішалкою. Було досліджено рух частинок у рідині і запропонований метод розрахунку відносних швидкостей в термінах теорії локальної ізотропної турбулентності Колмогорова для масоперенесення.

Для більш конкретної візуалізації складної хвильової форми турбулентності виявилися зручними концепції вихорів, які характеризуються швидкістю, масштабом (або хвильовим числом) і енергетичним спектром.

Великомасштабні рухи масштабу містять майже всю енергію, і вони безпосередньо відповідальні за дифузію енергії по всьому посуду для перемішування за рахунок кінетичної енергії і енергії тиску. Однак більша частина енергії майже не розсіюється.

Масштаб руху менше відповідає за передачу конвективної енергії ще меншим вихровим часткам. При ще менших масштабах вихорів, близьких до характерних мікромасштабів, як правило присутні дисипація в'язкою енергії й конвекція. Останній діапазон вирів отримав назву універсального рівноважного діапазону. Він був додатково розділений на область з малим розміром вихорів, підобласть в'язкої дисипації і область більшого розміру, підобласть інерційної конвекції.

Вимірювання енергетичного спектра в змішувальній ємності показують, що існує діапазон, в якому діє так званий сепеневий закон «-5/3». Відповідно, теорія локальної ізотропії Колмогорова може бути застосована через існування внутрішньої підобласті. Оскільки інтегроване значення локальної швидкості розсіювання енергії узгоджується з потужністю на одиницю маси рідини від робочого колеса, майже вся енергія від робочого колеса в'язко розсіюється в вихорах мікромасштаба.

Рекомендовано співвідношення масопереносу до частинок, підвішених в посудині з мішалкою. Результати експериментального дослідження приблизно на 12 % вище прогнозованих значень.

Ключові слова: масоперенос, адсорбція, перемішування, турбулентність, енергія, дисипація, критеріальне рівняння.

Соловей В.Н., к.техн.н., доцент, Горбунов К.А., к.техн.н., професор,
Верещак В.А., студент, Горбунова О.В., ст.преподаватель

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВНЕШНЕГО МАССОПЕРЕНОСА ПРИ АДСОРБЦИИ ИЗ РАСТВОРОВ В АППАРАТЕ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Изучен способ транспортно-контролируемого массопереноса к частицам, подвешенных в сосуде с мешалкой. Было исследовано движение частиц в жидкости и предложен метод расчета относительных скоростей в терминах теории локальной изотропной турбулентности Колмогорова для массопереноса.

Для более конкретной визуализации сложной волновой формы турбулентности оказались удобными концепции вихрей, которые характеризуются скоростью, масштабом (или волновым числом) и энергетическим спектром.

Крупномасштабные движения масштаба содержат почти всю энергию, и они непосредственно ответственны за диффузию энергии по всему сосуду для перемешивания за счет кинетической энергии и энергии давления. Однако большая часть энергии почти не рассеивается.

Масштаб движения меньше отвечает за передачу конвективной энергии еще меньшим вихревым частицам. При еще меньших масштабах вихрей, близких к характерному микромасштабу, как правило присутствуют диссипация вязкой энергии и конвекция. Последний диапазон водоворотов получил название универсального равновесного диапазона. Он был дополнительно разделен на область с малым размером вихрей, поддиапазон вязкой диссипации и область большего размера, поддиапазон инерционной конвекции.

Измерения энергетического спектра в смесительной емкости показывают, что существует диапазон, в котором действует так называемый степенной закон « $-5/3$ ». Соответственно, теория локальной изотропии Колмогорова может быть применена из-за существования внутреннего поддиапазона. Поскольку интегрированное значение локальной скорости рассеяния энергии согласуется с мощностью на единицу массы жидкости от рабочего колеса, почти вся энергия от рабочего колеса вязко рассеивается в вихрях микромасштаба.

Рекомендуется соотношение массопереноса к частицам, взвешенным в сосуде с мешалкой. Результаты экспериментального исследования примерно на 12 % выше прогнозируемых значений.

Ключевые слова: массоперенос, адсорбция, перемешивание, турбулентность, энергия, диссипация, критеріальное уравнение.

Solovej V., Gorbunov K., Vereshchak V., Gorbunova O.

**RESEARCH OF EXTERNAL MASS TRANSFER PROCESSES
FOR ADSORPTION FROM SOLUTIONS IN A APPARATUS WITH STIRRING**

A study has been made of transport-controlled mass transfer-controlled to particles suspended in a stirred vessel. The motion of particle in a fluid was examined and a method of predicting relative velocities in terms of Kolmogoroff's theory of local isotropic turbulence for mass transfer was outlined.

To provide a more concrete visualization of complex wave form of turbulence, the concepts of eddies, of eddy velocity, scale (or wave number) and energy spectrum, have proved convenient.

Large scale motions of scale contain almost all of the energy and they are directly responsible for energy diffusion throughout the stirring vessel by kinetic and pressure energies. However, almost no energy is dissipated by the large-scale energy-containing eddies. A scale of motion less than is responsible for convective energy transfer to even smaller eddy sizes. At still smaller eddy scales, close to a characteristic microscale, both viscous energy dissipation and convection are the rule. The last range of eddies has been termed the universal equilibrium range. It has been further divided into a low eddy size region, the viscous dissipation subrange, and a larger eddy size region, the inertial convection subrange.

Measurements of energy spectrum in mixing vessel are shown that there is a range, where the so called $-(5/3)$ power law is effective. Accordingly, the theory of local isotropy of Kolmogoroff can be applied because existence of the internal subrange. As the integrated value of local energy dissipation rate agrees with the power per unit mass of liquid from the impeller, almost all energy from the impeller is viscous dissipated in eddies of microscale.

The correlation for mass transfer to particles suspended in a stirred vessel is recommended. The results of experimental study are approximately 12 % above the predicted values.

Keywords: mass transfer, adsorption, mixing, turbulence, energy, dissipation, criterion equation.

Андреев О.В., к. техн. н., доцент, Загребельна Л.І., к. техн. н., доцент,
Кобець О.В., к. техн. н., доцент

ПЕРЕРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ НА В'ЯЗКІ РІДИНИ

*Українська інженерно-педагогічна академія,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*

Ключові слова: відцентрові насоси, частота обертання, мазут, в'язкість, ККД, коефіцієнт перерахунків подачі.

Сучасна промисловість широко використовує рідини, в'язкість яких суттєво відрізняється від в'язкості води.

В енергетиці ТЕС та ТЕЦ як резервне паливо використовують паливний мазут марок М-40 і М-100, в'язкість якого за робочих технічних температур в рази вище в'язкості води.

Масштаб мазутного господарства можна оцінити на прикладі ПАТ «Харківська ТЕЦ-5», до складу якого входять:

- залізнична естакада з фронтом зливу 26 цистерн;
- приймальний резервуар ємністю 1000 м³;
- три резервуари для мазуту ємністю 20000 м³ кожний;
- насоси для перекачування мазуту;
- підігрівачі мазуту.

Окремо слід відмітити роль ПАТ «Харківська ТЕЦ-5» у стабілізації тиску природного газу в газорозподільних системах Харкова. Під час загострення дефіциту газу епізодичний перехід ТЕЦ-5 з газу на мазут захищає енергосистему від колапсу.

Паливний мазут використовують в котельнях ЖКХ як основне паливо.

Паливний мазут марок Ф5 і Ф12 є основним паливом сучасного флоту.

Україна є великим транзитером нафти. Система нафтопроводів в Україні має 19 нафтопроводів загальною довжиною близько 4800 км, 51 нафтоперекачувальну станцію, роботу яких забезпечують 176 насосних агрегатів відцентрового типу, загальною потужністю 360 тис. кВт. Пропускна здатність системи дорівнює 114 млн. т/рік.

В нафтопереробній промисловості працюють тисячі відцентрових насосів на різних нафтопродуктах, між тим характеристики відцентрових насосів, що наведені в паспортах, або каталогах заводів-виробників, отримано шляхом випробувань модельних або натурних насосів на холодній воді. Користування паспортними характеристиками відцентрових насосів для в'язких рідин потребує їхніх перерахунків.

Наведені дані показують актуальність задачі перерахунку характеристик відцентрових насосів на в'язкі рідини.

Основними властивостями рідин, що впливають на характеристики насосів, є густина (щільність), в'язкість, тиск насиченої пари, поверхневий натяг тощо.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

У таблиці для ілюстрації наведено діапазони зміни деяких властивостей низки рідин, що перекачуються відцентровими насосами в деяких галузях промисловості.

Більшість робочих рідин має щільність меншу (на 10–20 %), ніж щільність води, в'язкість може бути більшою в рази, іноді на порядок, ніж в'язкість води.

Таблиця – Діапазони зміни властивостей низки рідин

Рідина	Щільність (густина) ρ , кг/м ³	В'язкість ν , Ст (см ² /с) за 20 °С
Вода	1000	0,0101
Гас	800–830	0,02–0,03
Оливи індустріальні		
I-12	880	0,5
I-20	885	1,0
I-30	890	1,7
I-50	910	4,0
Нафта різних родовищ		
	860	0,08–0,09
	880	0,284–0,341
	890	0,562–0,674
	900	1,444–1,556
Мазут (320К)	900–1050	(80 °С) 1,5– 5,0
Дизельне паливо	800–900	0,015–0,08

Характеристику насоса НК 150-125-315 представлено на рис. 1.

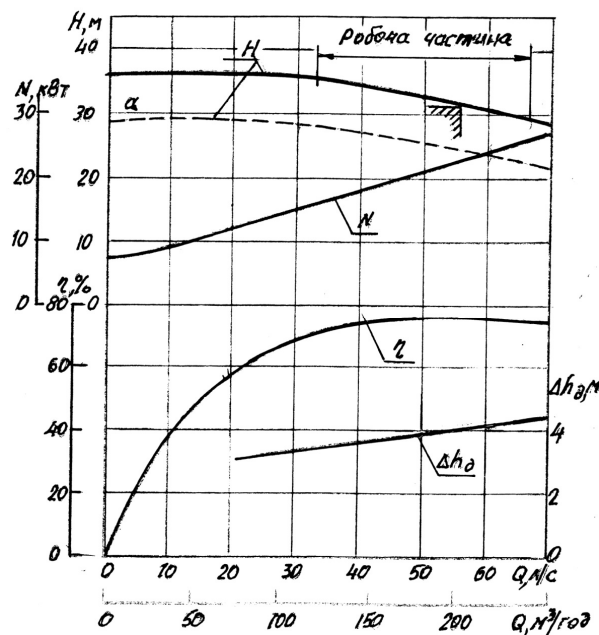


Рисунок 1 – Характеристика насоса НК 150-125-315:
 $n = 1450$ об/хв; α – індекс обточування робочого колеса

Гідрравлічні ($Q-H$) й енергетичні ($Q-N$), ($Q-\eta$), ($Q-\Delta h$) характеристики відцентрових насосів наведено в паспортах у вигляді відповідних графічних залежностей, отриманих в результаті випробувань на воді.

На рис. 1 показано такі характеристики консольного відцентрового нафтового насоса марки НК 150-125-315:

- Q – подача насоса л/с ($\text{м}^3/\text{год}$);
- H – напір, м,

$$H = H_n - H_b = (P_n - P_b) / \rho g ,$$

де P_n і P_b – тиски в нагнітальній та у всмоктувальній лініях, Па;

- N – потужність, кВт,

$$N = \frac{N_{\text{п}}}{\eta} = \frac{\rho g H Q}{\eta} \cdot 10^{-3} ,$$

де $N_{\text{п}}$ – корисна потужність, η – коефіцієнт корисної дії насоса;

- Δh – кавітаційний запас системи, м,

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_{\text{шт}}}{\rho g} - (\pm z) - \sum h ,$$

де P_1 – абсолютні тиск на вільній поверхні рідини в резервуарі, з якого виконується відкачування; $P_{\text{шт}}$ – тиск насиченої пари перекачуваної рідини, за робочою температурою, Па; z – рівень рідини від осі робочого колеса насоса, м; тобто відстань вздовж вертикалі від осі вала до рівня рідини в резервуарі, з якого її відкачують (знак «плюс», якщо робоче колесо вище рівня рідини, знак «мінус», якщо робоче колесо розташовано нижче рівня рідини – підпір); $\sum h$ – втрати напору у всмоктувальному трубопроводі за оптимальної подачі, м; $\Delta h_{\text{д}}$ – допустимий кавітаційний запас ($\Delta h_{\text{д}} \leq \Delta h$), м.

З метою використання характеристик насоса в системах АСУ для автоматичного керування подачею насоса потрібне аналітичне відображення характеристик. Зазвичай характеристику ($Q-H$) відображають у вигляді двочленної залежності [1]:

$$H = a - bQ^2 ,$$

де a і b – коефіцієнти апроксимації.

Характеристику ($Q-\eta$) також відображують у вигляді двочлена [1]:

$$\eta = kQ - k_1Q^2 ,$$

де k і k_1 – коефіцієнти апроксимації.

Аналітичне відображення характеристик $(Q-H)$ і $(Q-\eta)$ виконується на базі відповідних графічних характеристик, підрахунок коефіцієнтів апроксимації a, b, k, k_1 здійснюють методом найменших квадратів.

Робочі характеристики відцентрових насосів можуть бути змінені шляхом зміни зовнішнього діаметра робочого колеса D_2 (обточування колеса), або шляхом зміни частоти обертання n вала насоса.

Змінена характеристика насоса зв'язана з характеристиками насоса за номінальних значеннях D_2 та n таким чином [1]:

$$H = a(D_2'/D_2) - bQ^2,$$

$$H = a(n'/n)^2 - bQ^2.$$

де D_2' і n' – змінені діаметр колеса та частота його обертання.

Вплив в'язкості рідини на характеристики насоса

Як показують дослідження [2, 3], в'язкість рідини, що перекачується, впливає на форму характеристик насоса.

При перекачуванні рідини, що має більшу в'язкість ніж в'язкість води, збільшуються дискові і гідравлічні втрати насоса.

Подача, напір і ККД, завдяки збільшенню опору на тертя у каналах робочого колеса, зменшуються, а споживана потужність зростає.

На рис. 2 наведено графіки характеристик $(H-Q)$, $(N-Q)$, $(\eta-Q)$ відцентрового насоса з коефіцієнтом швидкохідності $n_s = 82$, побудовані за результатами випробувань на рідинах різної в'язкості [4].

Методика перерахунку характеристик відцентрових насосів з води на в'язкі рідини

Для перерахунку характеристик відцентрових насосів на в'язкі рідини з характеристик, що одержані при випробуваннях насоса на воді, вводять поправкові коефіцієнти K_a, K_H, K_η , які залежать від числа Рейнольдса, що обчислюється за формулою:

$$Re = (Q_{\text{опт}} / D_e v),$$

де $Q_{\text{опт}}$ – оптимальна подача насоса (при максимальному ККД насоса), м³/с; D_e – еквівалентний діаметр робочого колеса, м; v – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с;

На рис. 3 показано конструктивний переріз робочого колеса, користуючись яким визначимо D_e :

$$D_e = \sqrt{4D_2 b_2 K},$$

де D_2 – зовнішній діаметр робочого колеса, м; b_2 – ширина лопаті робочого колеса на зовнішньому діаметрі, м; K – коефіцієнт звуження перерізу робочого колеса лопатями на виході:

$$K = \frac{l_2 - \delta_2 z}{l_2} = \frac{\pi D_2 - \delta_2 z}{\pi},$$

де $l_2 = \pi D_2$; δ_2 – товщина лопаті на зовнішньому діаметрі колеса, м; z – кількість лопатей.

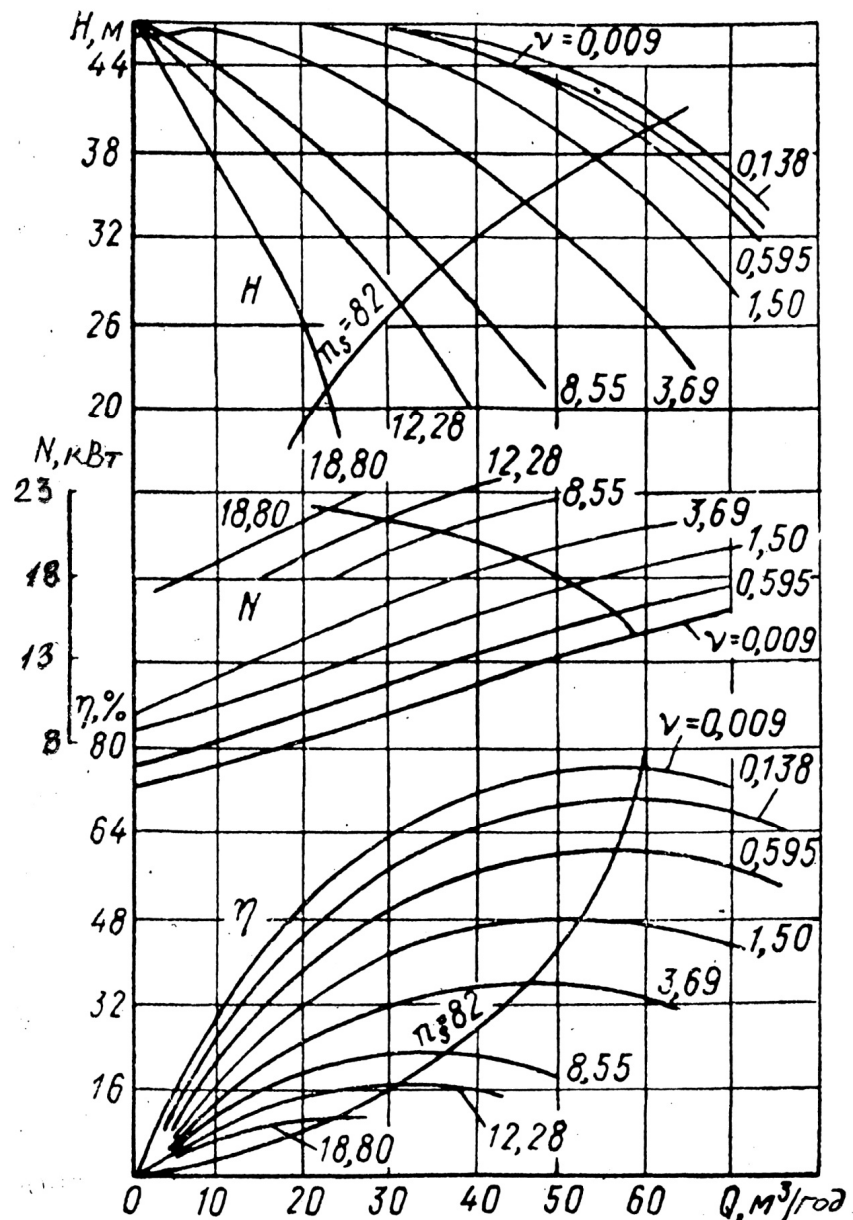


Рисунок 2 – Характеристики відцентрового насоса з робочим колесом одностороннього входу, що працює на в'язких рідинах на 2875 об/хв (ν – кінематична в'язкість рідин в Ст ($\text{см}^2/\text{с}$))

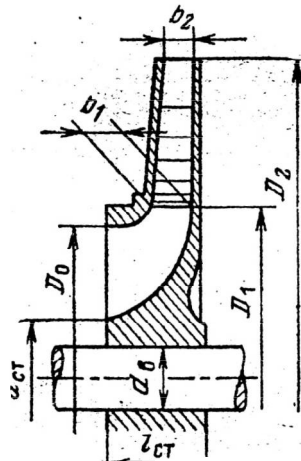


Рисунок 3 – Розрахункова конструктивна схема перерізу робочого колеса

Дослідження, використані авторами робіт [2, 4, 5], дозволили побудувати графіки залежності поправкових коефіцієнтів K_Q , K_H , K_η від числа Re (рис. 4).

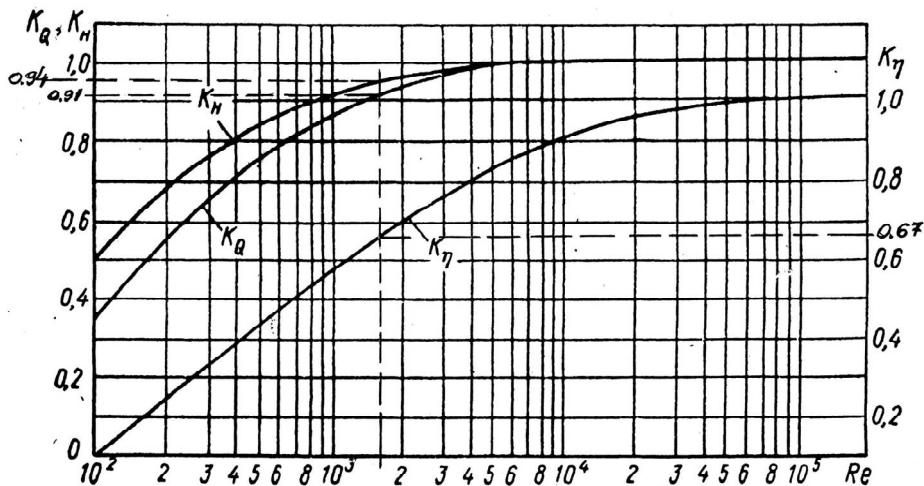


Рисунок 4 – Залежності поправкових коефіцієнтів від числа Re

Визначивши величини відповідних коефіцієнтів, можна отримати подачу, напір і ККД для в'язкої рідини:

$$Q_v = K_Q Q_B ;$$

$$H_v = K_H H_B ;$$

$$\eta_v = K_\eta \cdot \eta_B .$$

У формулах Q_v , H_v , η_v – відповідно подача, напір і ККД отримано з характеристики насоса, побудованої за результатами випробування насоса на воді.

Важливо зауважити, що коефіцієнти перерахунку, отримані при $Re = Q_{\text{опт}} / (D_e v)$, тобто лише для $Q_{\text{опт}}$ (при $\eta = \eta_{\text{max}}$) характеристик відцентрових насосів, що знаходяться в діапазоні подач $0,8Q_{\text{опт}} < Q_{\text{опт}} < 1,2Q_{\text{опт}}$, можна вважати постійними.

Окрім того, дослідження авторів робіт [2, 3] показали, що напір насоса H при подачі $Q = 0$, залишається незмінним для рідин будь якої в'язкості.

Встановлено також, що існує значення $Re_n = (7 \div 8) \cdot 10^3$, що визначає межу з переходу режиму течії рідини з області, де характеристики ($Q - H$) залежать від в'язкості, в зону автотельності, де вони не залежать від в'язкості.

Дослідження показують також, що достатньо висока точність перерахунків характеристик з води на в'язку рідину забезпечується для насосів коефіцієнти бистрохідності яких ($n_s = 3,65n\sqrt{Q/H^{3/4}}$) знаходяться в інтервалі $n_s = 50 \div 130$, тобто для тихохідних і нормальних коліс відцентрових насосів.

З підвищенням в'язкості рідини погіршується всмоктування відцентрових насосів, що потребує збільшення кавітаційного запасу Δh_d .

Висновки

1. Виконані дослідження підтвердили теоретичні розрахунки щодо впливу в'язкості рідини на вигляд характеристик відцентрових насосів.
2. Напір і подача на режимі максимального ККД зменшуються завдяки зростанню гідравлічних втрат в каналах робочого колеса.
3. Потужність зростає головним чином внаслідок зростання дискового тертя.
4. Особливо суттєво зменшується ККД насоса (на 25 % в розглянутому прикладі).
5. Приведення характеристик до аналітичного вигляду дозволяє застосувати АСУ регулювання подачі.
6. Засіб регулювання подачі за допомогою зміни частоти обертання забезпечує суттєве зниження витрати електроенергії (до 40 % в розглянутому прикладі).

Література

1. Лурье М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М. : Центр «ЛитНефтегаз». - ISBN 5-902665-02-7, 2004. – 350 с.
2. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности / М.Д. Айзенштейн. – М. : Гостоптехшбат, 1957. – 363 с.
3. Колпаков Л.Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов / Л. Г. Колпаков. – М. : Недра, 1985. – 184 с.
4. Чиняев И.А. Лопастные насосы : справочные пособия / И.А. Чиняев. – Л. : Машиностроение, 1973. – 184 с.

5. Зимин А.А. Гидравлические расчеты нефтепродуктов и насосных станций / А.А. Зимин. – М. : Госнаучтехиздат нефтяной и горно-топливной литературы, 1962. – 201 с.
6. Черкаський В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкаський. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
7. Укрпромотор. Інвертори серії Goodrive 20. – Харків, 2019. –16 с.
8. Куліненко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід : підручник / В. Р. Куліненко. – К. : Фірма «ІНКОС», 2006. – 616 с.
9. Куліненко В.Р. Лопатеві і гідроструменні багатofункціональні насосні установки : навч. посібник / В.Р. Куліненко, О.П. Ломейко. – Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011. – 223 с.
10. Яременко О.В. Испытания насосов / О.В. Яременко. – М. : Машиностроение, 1976. – 223 с.
11. ГОСТ 6134-2007. Насосы динамические. Методы испытаний. Международный стандарт.
12. Международный стандарт ИСО 5198-1987. Насосы центробежные. Правила испытаний для определения гидравлических характеристик.

Bibliography (transliterated)

1. Lure M.V. Zadachnyk po truboprovodnomu transportu nefty, nefteproduktov y haza / M. V. Lure.– М. : Tsentr «LytNeftehaz». – ISBN 5-902665-02-7, 2004. – 350 p.
2. Aizenshtein M.D. Tsentrobeznyye nasosy dlia neftianoі promyshlennosty / M.D. Aizenshtein. – М. : Hostoptekhshchbat, 1957. – 363 p.
3. Kolpakov L.H. Tsentrobeznyye nasosy mahystralnykh nefteprovodov / L.H. Kolpakov. – М. : Nedra, 1985. – 184 p.
4. Chyniaiev Y.A. Lopastnyye nasosy : spravochnyye posobyia / Y.A. Chyniaiev.– L. : Mashynostroenye, 1973. – 184 p.
5. Zymyn A.A. Hydravlycheskye raschety nefteproduktov y nasosnykh stasyi / A.A. Zymyn. – М. : Hosnaughtekhyzdat neftianoі y horno-toplyvnoi lyteratury,1962.– 201 p.
6. Cherkaskyi V.M. Nasosy, ventylyatory, kompressory / V. M. Cherkaskyi. – М. : Enerhoatomyzdat, 1984. – 416 p.
7. Ukrpromotor. Invertory serii Goodrive 20. – Kharkiv, 2019. –16 p.
8. Kulinchenko V.R. Hidravlika, hidravlichni mashyny i hidropyryvid : pidruchnyk / V. R. Kulinichenko. – К. : Firma «ІНКОС», 2006. – 616 p.
9. Kulinchenko V.R. Lopatevi i hidrostrumenni bahatofunktsionalni nasosni ustanovky : navch. posibnyk / V. R. Kulinchenko, O.P. Lomeiko. – Melitopol : TOV «Vydavnychiy budynok MMD», 2011. – 223 p.
10. Iaremenko O.V. Ysptytanyia nasosov / O.V. Yaremenko. – М. : Mashynostroenye, 1976. – 223 p.
11. HOST 6134-2007. Nasosy dynamycheskye. Metody uspytanyi. Mezhdunarodnyi standart.
12. Mezhdunarodnyi standart YSO 5198-1987. Nasosy tsentrobeznyye. Pravyla uspytanyi dlia opredeleniya hydravlycheskykh kharakterystyk.

УДК 629.7.036.22

Андреев О.В., к.техн.н., доцент, Загребельна Л. І., к.техн.н., доцент,
Кобець О. В., к.техн.н., доцент

ПЕРЕРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ НА В'ЯЗКІ РІДИНИ

Актуальність роботи пояснюється великим обсягом застосування сучасною промисловістю відцентрових насосів для перекачування в'язких рідин. В енергетиці – це застосування ТЕС і ТЕЦ як резервного палива мазуту, мінеральних олив і мастил на нафтогазовій основі тощо.

Використання паспортних характеристик відцентрових насосів для в'язких речовин потребує їхнього перерахунку. Наведені дані показують актуальність задачі перерахунку характеристик відцентрових насосів на в'язкі речовини.

В нафтовій галузі працюють тисячі відцентрових насосів на нафтоперекачувальних станціях і в технологічних процесах нафтопереробки.

В роботі використовуються сучасні методи перерахунку характеристик відцентрових насосів з води на в'язкі рідини.

Проведені дослідження і аналіз їхніх результатів дають можливість на прикладі застосування АСУ керувати подачею відцентрового насоса в технологічному процесі крекінгу нафтопродуктів .

Представлено аналітичні дослідження методики перерахунків.

Надана характеристика відцентрових насосів шляхом підрахунків коефіцієнтів апроксимації методом найменших квадратів.

Виконані дослідження підтвердили теоретичні висновки про вплив в'язкості рідини на вигляд характеристик відцентрових насосів.

Дослідження показують також, що достатньо висока точність перерахунків характеристик з води на рідину забезпечується для насосів, швидкохідності яких знаходяться в інтервалі $n = 50-130$, тобто для тихохідних і нормальних коліс відцентрових насосів.

З підвищенням якості рідини погіршується обертання валу колеса. Тому виникає необхідність мати характеристики таких насосів для різних частот обертання. Побудова таких характеристик основана на теорії подібності відцентрових насосів, з якої отримано так звані формули пропорційності, що дозволяють перерахувати ($Q - H$) характеристики насоса під час зміни частоти обертання.

Приведення характеристик до аналітичного вигляду дозволяє застосувати АСУ регулювання подачі. Засіб регулювання за допомогою зміни частоти обертання забезпечує суттєве зниження витрати електроенергії.

Наведені дані показують актуальність задачі перерахунку характеристик відцентрових насосів на в'язкі речовини.

Ключові слова: відцентрові насоси, частота обертання, мазут, в'язкість, ККД, коефіцієнт перерахунків подачі.

Андреев А.В., к. техн. н., доцент, Загребельная Л.И., к. техн. н., доцент,
Кобец Е.В., к. техн. н., доцент

ПЕРЕРАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НА ВЯЗКИЕ ЖИДКОСТИ.

Актуальность работы объясняется большим объемом применения современной промышленностью центробежных насосов для перекачки вязких жидкостей. В энергетике – это применение ТЭС и ТЭЦ в качестве резервного топлива мазута, минеральных масел и смазок на нефтегазовой основе и т.д.

Использование паспортных характеристик центробежных насосов для вязких веществ требует их пересчета. Приведенные данные показывают актуальность задачи пересчета характеристик центробежных насосов на вязкие вещества.

В нефтяной отрасли работают тысячи центробежных насосов на нефтеперекачивающих станциях и в технологических процессах нефтепереработки.

В работе используются современные методы пересчета характеристик центробежных насосов с воды на вязкие жидкости.

Проведенные исследования и анализ их результатов дают возможность на примере применения АСУ управлять подачей центробежного насоса в технологическом процессе крекинга нефтепродуктов.

Даны аналитические исследования методики пересчета.

Приведена характеристика центробежных насосов, полученная путем расчетов коэффициентов аппроксимации методом наименьших квадратов.

Выполненные исследования подтвердили теоретические данные о влиянии вязкости жидкости на вид характеристик центробежных насосов.

Исследования показывают также, что достаточно высокая точность пересчета характеристик для перехода с воды на другую жидкость реализуется для насосов, быстроходности которых находятся в интервале $n = 50-130$, то есть для тихоходных и нормальных колес центробежных насосов.

С улучшением качества жидкости ухудшается вращение вала колеса. Поэтому возникает необходимость иметь характеристики таких насосов для разных частот вращения. Построение таких характеристик основано на теории сходства центробежных насосов, из которой получены так называемые формулы пропорциональности, которые позволяют пересчитать ($Q - H$) характеристики насоса во время изменения частоты вращения.

Приведение характеристик к аналитическому виду позволяет применить АСУ регулирования подачи. Способ регулирования с помощью изменения частоты вращения обеспечивает существенное снижение затрат электроэнергии.

Приведенные данные показывают актуальность задачи пересчета характеристик центробежных насосов на вязкие вещества.

Ключевые слова: центробежные насосы, частота вращения, мазут, вязкость, ККД, коэффициент пересчета подачи.

Andreev O.V., Zagrebelnaya L.I., Kobets O.V.

CONVERSION OF CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGAL PUMPS TO VISCOUS LIQUIDS

The urgency of the work is due to the large use of modern industry centrifugal pumps for pumping viscous liquids. In the energy sector, this is the use of fuel oil and thermal power plants, mineral oils and oil and gas-based lubricants as reserve fuel, and so on.

The use of the characteristics of centrifugal pumps for viscous substances requires their recalculation. These data show the relevance of the problem of recalculating the characteristics of centrifugal pumps for viscous substances.

In the oil industry, thousands of centrifugal pumps operate at oil pumping stations and in oil refining processes.

The conducted researches and the analysis of their results give the chance to control giving of the centrifugal pump in technological process of cracking of oil products on an example of application of ACS.

Analytical researches of a technique of recalculations are given.

The characteristic of centrifugal pumps by calculations of approximation coefficients by the method of least squares is given.

The performed studies confirmed the theoretical data on the influence of liquid viscosity on the appearance of the characteristics of centrifugal pumps.

Studies also show that a sufficiently high accuracy of calculations of characteristics from water to liquid is provided for high-speed pumps which are in the range $n = 50-130$, that is for low-speed and normal wheels of centrifugal pumps.

With the improvement of fluid quality, the rotation of the wheel shaft deteriorates. Therefore, there is a need to have the characteristics of such pumps at different speeds. The construction of such characteristics is based on the theory of similarity of centrifugal pumps, from which the so-called proportionality formulas are obtained, which allow to list ($Q-H$) the characteristics of the pump when the speed changes.

Bringing characteristics to the analytical form allows you to use the Ace feed control. The means of regulation by changing the speed provides a significant reduction in electricity consumption.

These data show the relevance of the problem of recalculating the characteristics of centrifugal pumps for viscous substances.

Keywords: centrifugal pumps, speed, fuel oil, viscosity, efficiency, feed conversion factor.

Павлова В.Г.¹, к.техн.н., ст. викладач, Кошельник О.В.^{1,2}, к.техн.н., доцент,
Пугачова Т.М.¹, к.техн.н., професор, Круглякова О.В.¹, к.техн.н., доцент,
Долобовська О.В.¹, асистент

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ПАРОВО- ТА КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ НА ТЕПЛООБМІН В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, м. Харків

Ключові слова: випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини; підвищення ефективності.

Вступ. Економічність роботи випарної установки визначається капітальними і експлуатаційними витратами на одиницю виробленої продукції. Значна частина витрат енергії припадає на видалення вологи з розчинів, що пов'язано з підігрівом та випарюванням великих об'ємів рідини. Для зниження енерговитрат в даному випадку можуть бути використані багатоступінчасте випарювання та термокомпресори із струменевим або механічним стисканням пари. У найбільш складних випарних установках можуть застосовуватися всі перераховані вище методи.

Велика частина енергетичних витрат пов'язана безпосередньо з видаленням вологи з розчину, що оброблюється. У цьому випадку застосування багатоступеневого випарювання зменшує споживання теплоти за рахунок використання в якості пари, що гріє, вторинної пари з попереднього корпусу установки в наступному корпусі. До того ж термічна компресія вторинної пари дозволяє підвищити тиск і температуру насиченої пари, що дає можливість використовувати її в якості гріючої, тим самим підвищити ефективність роботи апарату і знизити загальне енергетичне споживання.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми. Слід зазначити, що збільшення числа корпусів призводить з одного боку до збільшення економії теплоти, а з іншого боку збільшує необхідні капіталовкладення. Так, якщо порівнювати застосування однокорпусної випарної установки з двохкорпусною, остання заощадить 50 % пари, а при застосуванні трикорпусної в порівнянні з двохкорпусною економія становитиме лише 17 % [1]. При цьому збільшення кількості корпусів має наслідком зниження температурного напору в кожному з них, що вимагає збільшення площі поверхонь теплопередачі та в свою чергу приводить до зростання вартості установки. Тому питання, що стосуються вибору і оптимізації випарного обладнання, його конструктивних особливостей, вимагають додаткового розгляду.

Особливий інтерес викликає дослідження по розробці апаратів інтенсивної дії, в яких процес випарювання за рахунок багаторазового використання теплоносія, дозволив би збільшити їх енергоефективність. Більшість таких конструкцій працює в плівко-

вому режимі випарювання. Експериментальне та теоретичне дослідження процесів плівкової течії рідини відображено в роботах [1, 2, 5, 6].

Вибір конструкції випарного апарату залежить від технологічних вимог до процесу випарювання та фізико-хімічних властивостей розчинів. Властивості сумішей визначають основні вимоги до умов проведення процесу, а також до конструкцій випарних апаратів. Для термічно нестійких речовин використовують плівкові випарні апарати, які мають обмеження по чистоті розчину.

Серед переваг останніх можна відзначити: значно менші габарити і металоємність порівняно з випарними апаратами з винесеною зоною кипіння; малий час протікання процесу випарювання. Тут може бути досягнута висока ефективність обладнання за рахунок застосування механічного або термічного компресора вторинної пари, що дозволяє максимально використовувати мінімальний температурний напір і можливості багатоступінчастого випарювання.

Перераховані переваги плівкових випарних апаратів викликають значний практичний інтерес для пошуку методів реалізації процесу випарювання солевмісних розчинів, що дає можливість розширити галузь їх застосування.

В значній мірі ускладнює математичний опис процесу випарювання зміна фізичних властивостей розчину при його випаровуванні. Незважаючи на широке коло досліджень в області кипіння, застосування різних типів апаратів, знання в даній області в даний час є ще недостатніми для створення формул, що мають універсальне застосування.

Викладення основної частини дослідження. Інтенсивність тепловіддачі в плівці, що стікає, значно вище, ніж при тепловіддачі в великому об'ємі [3]. Коефіцієнт тепловіддачі при плівковому режимі $\alpha_{пл}$ завжди буде більше, ніж коефіцієнт α в об'ємі внаслідок того, що товщина плівки $\bar{\delta}$ завжди менше діаметра трубки $d_{тр}$. Тут можна записати таке співвідношення:

$$\frac{\alpha_{пл}}{\alpha} = \frac{d_{тр}^2}{4\bar{\delta}(d_{тр} - \bar{\delta})}$$

Тонкий шар рідини, яка стікає, має незначний термічний і дифузійний опір, при цьому частки суспензії посилено перемішуються, що призводить до інтенсивного процесу тепло- і масопереноса. Цьому сприяють процеси хвилеутворення, природна і штучна турбулізація потоку. Однак при цьому виникають труднощі технологічного характеру, пов'язані з необхідністю створення рівномірного розподілу по периметру рідкого шару і всій поверхні нагрівання. Розрив плівки рідини призводить до зниження інтенсивності теплообміну і накипоутворення, що погіршує роботу апарата. До того ж значну роль в цих процесах відіграє теплообмін в тонкому приграничному шарі та пристінкова турбулентність [4].

Одним із способів зниження швидкості інкрустації поверхонь нагріву, є додавання в вихідний неупарений розчин різних добавок, в тому числі і готової твердої фази [7]. Проведені дослідження в даній області показали, що введення домішок на поча-

тку процесу випарювання призводить до значного зменшення обсягів відкладень на поверхнях нагрівання, що дає можливість збільшити час роботи апарату без додаткового його обслуговування. Різноманіття розчинів призводить до того, що в кожному конкретному випадку необхідно підбирати окрему домішку. Однак застосування деяких з них є досить витратним внаслідок високої вартості. Що ж стосується введення невеликої кількості готової твердої фази розчину, який упарюється, то це істотно спрощує завдання. Значна частина процесу кристалізації йде на кристалах-зародках, тим самим знижуючи швидкість інкрустації самої поверхні теплообміну.

Відомо, що на швидкість накипоутворення істотно впливає форма і стан поверхні нагрівання. На гладких трубках швидкість інкрустації менша, ніж на шорсткуватих або забруднених поверхнях. В «центрах» кристалізації, які з'явилися на поверхнях нагріву, процес кристалізації йде швидше, ніж на чистій поверхні. Якщо в початковий розчин, який упарюють, ввести невелику кількість готової твердої фази (зародки), то інтенсивність процесу кристалізації зміститься в бік зародки, тим самим зменшуючи інкрустацію поверхонь нагріву. Так само на процесі кристалізації впливає швидкість течії потоку та ступінь його турбулентності. Порушуючи пристінковий приграничний шар, в якому йдуть основні процеси теплообміну і кристалізації, кристали, що знаходяться в потоці рідини, інтенсифікують теплопередачу, впливають на швидкість утворення парової фази і ймовірність утворення кристалічної на поверхні теплообміну.

Можна відзначити, що стосовно плівкових випарних апаратів практично відсутні дослідження процесів плівкової течії розчинів, що кристалізується, які враховують особливості перебігу трифазних рідин, кристалізаційних процесів.

Для вирішення поставленого завдання розглядався процес теплообміну в плівці трифазної рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. При цьому виходили з наступного: суспензія складається з рідкої, твердої і парової фаз. Рідка фаза – це багатокомпонентна система, що складається з розчинника, компонентів, що кристалізуються та компонентів, що не кристалізуються. Розчинник, який випаровується, видаляється в парової потік, що стікає. Основна маса твердої фази кристалізується на зародок цієї фази, яка внесена в розчин на початку процесу. Напрямок руху пари і плівки збігаються. Товщина плівки, яка стікає, більше найбільшої частки, але менше її довжини і діаметру трубки. Останнє дає можливість дещо спростити поставлене завдання і розглядати процеси, що протікають, в двомірній системі координат. Мала товщина плівки і турбулентність призводять також до допущення сталості значень концентрації і температури в поперечному перерізі, а зміна розглядається по нормалі до поперечного перерізу – осі y , що збігається з напрямом руху плівки. При дослідженні процесу теплообміну в плівці рідини, що стікає, була побудована модель плівкової течії трифазної рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. Залежно від теплового навантаження розглядалося два види пароутворення.

При дії малих теплових навантажень q (до 3 кВт) випаровування йде з поверхні плівки, а бульбашки утворюються на зовнішній границі «рідина-пар». Розчинник з зовнішнього кордону видаляється в товщу потоку. Тепловіддача визначається гідродинамікою рідини в плівці, тут діє перенос тепла конвекцією.

Зі збільшенням теплового потоку на поверхні теплообміну починається утворення бульбашок пари. При цьому процес перенесення тепла визначається процесом

пароутворення, швидкістю утворення, зростання і руху бульбашок пари в плівці.

Математична модель теплообміну плівкової течії рідинної суспензії повинна включати в себе рівняння нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз та теплообміну.

Істотно змінює загальну картину теплообміну наявність твердої фази [8, 10–12]. Вона турбулізує сам потік плівки, прориває й частково руйнує пристінковий приграничний шар, що також впливає на процеси пароутворення і руйнування бульбашок, їх відрив і спливання. Тим самим підвищується інтенсивність теплообмінних процесів в апараті, збільшується ефективність установки в цілому. Основні кристалізаційні процеси йдуть на поверхні готової кристалічної фази. Рівняння руху трифазного потоку зі змінним вмістом фаз мають такий вигляд.

При пароутворенні на поверхні плівки:

$$\begin{aligned} & g\rho_p - 2\mu \left[\left[2 \left(\frac{\partial^2 \bar{w}_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}_p}{\partial y^2} \right) / d + \left(\frac{\partial^2 \bar{w}'_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}'_r}{\partial y^2} \right) / \bar{l}_{кр} \right] + (\sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}) \cdot \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \right. \\ & = \rho_p \left(1 - \beta_r \frac{\rho_p}{\rho_r} \right) \left(\frac{\partial \bar{w}_p}{\partial \tau} + \bar{w}_{ж} \frac{\partial \bar{w}_p}{\partial x} + \bar{w}' \frac{\partial \bar{w}_p}{\partial y} \right) + \beta_r \rho_p \left(\frac{\partial \bar{w}_r}{\partial \tau} + \bar{w}_r \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial x} + \bar{w}_r \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial y} \right) + \\ & \quad + (\bar{w}_r - \bar{w}_p) \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\beta_r \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_r \rho_p \bar{w}_r) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_r \rho_p \bar{w}_r) \right]. \end{aligned}$$

При пароутворенні на теплообмінній поверхні апарату:

$$\begin{aligned} & g\rho_p - 2\mu \left[\left[2 \left(\frac{\partial^2 \bar{w}_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}_p}{\partial y^2} \right) / d + \left(\frac{\partial^2 \bar{w}'_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}'_r}{\partial y^2} \right) / \bar{l}_{кр} \right] + (\sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}) \cdot \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = \right. \\ & = \rho_p \left(1 - \beta_n \frac{\rho_p}{\rho_n} - \beta_r \frac{\rho_p}{\rho_r} \right) \left(\frac{\partial \bar{w}_p}{\partial \tau} + \bar{w}_ж \frac{\partial \bar{w}_p}{\partial x} + \bar{w}' \frac{\partial \bar{w}_p}{\partial y} \right) + \\ & + \beta_r \rho_p \left(\frac{\partial \bar{w}_r}{\partial \tau} + \bar{w}_r \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial x} + \bar{w}_r \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial y} \right) + \beta_n \rho_p \left(\frac{\partial \bar{w}_n}{\partial \tau} + \bar{w}_n \frac{\partial \bar{w}_n}{\partial x} + \bar{w}_n \frac{\partial \bar{w}_n}{\partial y} \right) + \\ & + (\bar{w}_r - \bar{w}_n) \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\beta_r \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_r \rho_p \bar{w}_r) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_r \rho_p \bar{w}_r) \right] + \\ & + (\bar{w}_n - \bar{w}_p) \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\beta_n \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_n \rho_p \bar{w}_p) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_n \rho_p \bar{w}_p) \right], \end{aligned}$$

де ρ_p, ρ_n, ρ_r – щільності рідкої, парової та твердої фаз відповідно; $\beta_n, \beta_r, \beta_p$ – масові частки парової, твердої і рідкої фази, що виділяється в плівці суспензії; β_r' – масова частка твердої фази в плівці суспензії; $\partial \bar{w}_p, \partial \bar{w}_n, \partial \bar{w}_r$ – збільшення швидкості руху рідкої, парової та твердої фаз відповідно; $l_{кр}$ – розміри кристалічної фази; σ_{1-2} – поверхневий натяг на границі рідкої і твердої фаз; σ_{2-3} – поверхневий натяг на границі рідкої і парової

фаз; $(\sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}) \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$ – множник, який враховує дію сил поверхневого натягу на границі «пар-суспензія».

Таким чином, представлені рівняння дозволяють описати особливості процесу тепломасообміну в разі наявності в розчині твердої фази.

Висновки. Для зменшення швидкості інкрустації поверхонь нагріву в випарних апаратах пропонується додавання в вихідний неупарений розчин готової твердої фази. Введення такої домішки на початку процесу випарювання призводить до значного зменшення відкладень на поверхні нагріву апарата. Це дає можливість збільшити час роботи обладнання без додаткового його обслуговування.

Розглянуто процес плівкової течії багатокомпонентної суміші з перемінним вмістом фаз. Проаналізовані особливості процесів пароутворення і кристалоутворення та їх взаємний вплив на теплообмін в плівці рідини, яка стікає. Представлена математична модель процесу теплообміну плівкової течії рідинної суспензії з рівнянням руху трифазного потоку зі змінним вмістом фаз. Розглянутий метод дозволяє знизити інтенсивність процесів накипоутворення на поверхні, що передає тепло, і збільшити час роботи апаратів без промивання.

Література

1. Гавриличенко И.Г. Экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов выпаривания при плёночном течении жидкости / И.Г. Гавриличенко, Ю.Б. Данилов // Вісник Національного технічного університета «ХПІ». Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 16 (1059). – С. 12–21.
2. Данилов Ю.Б. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой / Ю.Б. Данилов, Л.М. Ульев // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С. 84–96.
3. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / В.Х. Мак-Адамс. – Москва: Металлургиздат, 1961. – 362 с.
4. Кутателадзе С.С. Пристенная турбулентность / С.С. Кутателадзею. – Новосибирск: Наука, 1973. – 228 с.
5. Гимбутис Г. Теплообмен в гравитационном течении плёнки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Моксла, 1988. – 232 с.
6. Воронцов Е.Г. Теплообмен в жидкостных плёнках / Е.Г. Воронцов, Ю.М. Татанайко. – Киев : Техника, 1972. – 196 с.
7. Фокин В.С. Математическая модель теплообмена при вынужденном движении жидкостных суспензий/ В.С. Фокин, В.М. Кошельник, В.Г. Павлова // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков : ХГПУ, 1998. – Вып. 13. – С. 37–40.
8. Павлова В.Г. Теплообмен при пленочном течении трехфазной жидкостной суспензии в выпарных аппаратах / В.Г. Павлова // Коммунальное хозяйство городов. – 2003. – № 49. – С. 70–74.

9. Фокин В.С. К расчету коэффициента теплоотдачи в ширококанальных пластинчатых греющих камерах/ В.С. Фокин, В.Г. Павлова, И.В. Иванова // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 1. – С. 14–17.

10. Фокин В.С. Основы переноса тепла при пленочном движении жидкостной суспензии/ В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002 – № 6., Т.1. – С. 94–97.

11. Фокин В.С. Влияние твердой фазы на процессы упаривания кристаллизирующихся растворов в аппаратах со стекающей пленкой/ В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 9, Т. 12. – С. 180–183.

12. Фокин В.С. Теплообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии / В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып. 12. – С. 123–126.

Bibliography (transliterated)

1. Gavrilichenko I.G. Eksperimental'nye issledovaniya teplogidrodinamicheskikh processov vyparivaniya pri plyonochnom techenii zhidkosti / I.G. Gavrilichenko, Yu.B. Danilov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universyteta «KhPI». Ser. Innovacijni doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 16 (1059). – P. 12-21.

2. Danilov YU.B Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya teploperedachi i kipeniya v vyparnykh apparatah so stekayushchej plyonkoj/ YU.B Danilov, L.M. Ul'ev // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2012. – № 3. – P 84–96.

3. Mak-Adams V.H. Teploperedacha / V.H. Mak-Adams. – Moskva: Metallurgizdat, 1961. – 362 p.

4. Kutateladze S.S. Pristennaya turbulentnost'/ S.S. Kutateladze. – Novosibirsk: Nauka, 1973. – 228 p.

5. Gimbutis G. Teploobmen v gravitacionnom techenii plyonki zhidkosti / G. Gimbutis. – Vil'nus : Mokslo, 1988. – 232 p.

6. Voroncov E.G. Teploobmen v zhidkostnykh plyonkakh / E.G. Voroncov, Yu.M. Tatanajko – Kiev: Tekhnika, 1972. – 196 p.

7. Fokin V.S. Matematicheskaya model' teploobmena pri vynuuzhennom dvizhenii zhidkostnykh suspenzij/ V.S. Fokin, V.M. Koshel'nik, V.G. Pavlova // Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. – Kharkov: KhGPU, 1998. – Vyp. 13. – P. 37–40.

8. Pavlova V.G. Teploobmen pri plenochnom techenii trekhfaznoj zhidkostnoj suspenzii v vyparnykh apparatah / V.G. Pavlova // Kommunal'noe hozyajstvo gorodov. – 2003. – № 49. – P. 70–74.

9. Fokin V.S. K raschetu koeffitsienta teplootdachi v shirokokanalnykh plastinchatykh greyuschiykh kamerah/ V.S. Fokin, V.G. Pavlova, I.V. Ivanova // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2011. – № 1. – P. 14–17.

10. Fokin V.S. Osnovy perenosa tepla pri plenochnom dvizhenii zhidkostnoj suspensii/ V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2002. – № 6, Т. 1, – Р. 94-97.

11. Fokin V.S. Vliyanie tverdoj fazy na processy uparivaniya kristalliziruyushchihsvya rastvorov v apparatah so stekayushchej plenkoj/ V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2003. – Vyp. 9, Т.12. – Р. 180–183.

12. Fokin V.S. Teplomassoobmen pri plenochnom techenii mnogokomponentnoj zhidkosti suspensii / V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPI». Ehnergeticheskie i teplotekhnicheskie processy i oborudovanie. – Kharkov: NTU «KhPI», 2004. – Vyp. 12. – Р. 123–126.

УДК 66.048.5

Павлова В.Г., к.техн.н., ст. викладач, Кошельник О.В., к.техн.н., доцент, Пугачова Т.М., к.техн.н., професор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент, Долобовська О.В., асистент

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ПАРО- ТА КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ НА ТЕПЛООБМІН В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

Для зміни концентрації розчинів застосовуються процеси випарювання, що здійснюються у випарних установках, які в залежності від виду оброблюваної речовини мають різну конструкцію. Значна витрата енергії в таких апаратах пов'язана з необхідністю видалення великих обсягів вологи. Ефективним способом підвищення енергоефективності процесу є використання багатокорпусних випарних установок, однак їхня вартість є досить високою. В якості альтернативи можливо застосування випарних апаратів з багаторазовим використанням теплоносія, які працюють у плівковому режимі. Їхньою перевагою є наявність компресора вторинної пари, що дає можливість ефективно використовувати мінімальний температурний напір. Однак вони мають ряд обмежень по вимогах до чистоти розчину. Одним зі способів зниження швидкості інкрустації поверхонь нагрівання є добавка у вихідний розчин готової твердої фази. Однак це вимагає додаткових досліджень і створення математичної моделі, що дасть можливість моделювати складні тепломасообмінні процеси при плівковій течії розчинів, що кристалізуються, та супроводжуються зміною фізичних характеристик розчину і накипоутворенням. У моделі розглядалася трифазна рідка суспензія зі вмістом фаз, що змінюється. Представлено два етапи пароутворення – на поверхні рідини та на поверхні теплообміну. Наявність твердої фази турбулізує потік і інтенсифікує процес теплообміну. Тому в математичну модель включені рівняння руху трифазного потоку з вмістом фаз, що змінюється, для двох випадків пароутворення. Дана математична модель також містить у собі рівняння нерозривності, енергії й теплообміну. Розглянутий метод боротьби з накипоутворенням дозволить знизити швидкість інкрустації поверхонь випарних апа-

ратів зі стікаючою плівкою для розчинів, що кристалізуються. Це у свою чергу дозволить зменшити капітальні й експлуатаційні витрати для апаратів даного типу.

Ключові слова: випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини; підвищення ефективності.

Павлова В.Г., к.техн.н., ст. преподаватель, Кошельник А.В., к.техн.н., доцент,
Пугачова Т.Н., к.техн.н., профессор, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент,
Долобовская О.В., ассистент

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРО- И КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН В ПЛЕНОЧНЫХ ВЫПАРНЫХ АППАРАТАХ

Для изменения концентрации растворов применяются процессы выпаривания, осуществляемые в выпарных установках, которые в зависимости от вида обрабатываемого вещества имеют различную конструкцию. Значительный расход энергии в таких аппаратах связан с необходимостью удаления больших объемов влаги. Эффективным способом повышения энергоэффективности процесса является использование многокорпусных выпарных установок, однако их стоимость является довольно высокой. В качестве альтернативы возможно применение выпарных аппаратов с многократным использованием теплоносителя, которые работают в пленочном режиме. Их преимуществом является наличие компрессора вторичного пара, что дает возможность эффективно использовать минимальный температурный напор. Однако они имеют ряд ограничений по требованиям к чистоте раствора. Одним из способов снижения скорости инкрустации поверхностей нагрева является добавка в исходный раствор готовой твердой фазы. Однако это требует дополнительных исследований и создания математической модели, что даст возможность моделировать сложные теплообменные процессы при пленочном течении кристаллизующихся растворов, сопровождающиеся сменой физических характеристик раствора и накипеобразованием. В модели рассматривалась трехфазная жидкая суспензия с изменяющимся содержанием фаз. Представлены два этапа парообразования – на поверхности жидкости и на поверхности теплообмена. Наличие твердой фазы турбулизирует поток и интенсифицирует процесс теплообмена. Поэтому в математическую модель включены уравнения движения трехфазного потока с изменяющимся содержанием фаз для двух случаев парообразования. Данная математическая модель также включает в себя уравнения неразрывности, энергии и теплообмена. Рассмотренный метод борьбы с накипеобразованием позволит снизить скорость инкрустации поверхностей выпарных аппаратов со стекающей пленкой для кристаллизующихся растворов. Это в свою очередь позволит уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты для аппаратов данного типа.

Ключевые слова: выпарные аппараты, упаривание кристаллических растворов, пленочное течение многофазного вещества; повышение эффективности.

Koshelnik O., Pavlova V., Pugacheva T., Kruglyakova O., Dolobovska O.

INFLUENCE OF VAPOR AND CRYSTAL FORMATION PROCESSES ON HEAT EXCHANGE IN FILM VAPORATORS

Evaporators for changing the concentration of solutions have a different design, depending on the type of processed substance.

Significant energy consumption in such equipment is associated with the need for removing large quantity of liquid phase.

Multiple-effect evaporators are used to reduce the energy consumption of the evaporation process, but such equipment is quite expensive.

Evaporators with secondary vapor heat reusing that operate in film mode can be an alternative to multi-effect evaporators. This equipment can operate efficiently across minimal temperature differences due to secondary vapor compressors. The disadvantage of this device is strict requirements for impurities in solutions.

Impurities create deposits (incrustations) of various substances on the heat transfer surfaces, which worsens the operating conditions.

If crystallizing solutions are used in evaporators with reusing of secondary vapor heat, then one of the ways to reduce the rate of heating surfaces incrustation is to add a solid phase to the initial solution.

A mathematical model is proposed to describe the processes of heat and mass transfer during the film flow of crystallizing solutions, which are accompanied by a change in the physical characteristics of the solution and the formation of deposits.

The model considers a three-phase liquid suspension with a varying phase content. Two stages of vaporization including vaporization on the surface of the liquid and on the surface of heat exchange are presented.

The mathematical model involves the equations of continuity, energy and heat transfer, as well as the equations of motion of a three-phase flow with a changing phase content for both stages of vaporization, taking into account that solid phase turbulizes the flow and intensifies the heat transfer process.

This mathematical model makes it possible to study the effect of the solid phase on heat transfer processes and the rate of incrustation in evaporators with reuse of secondary vapor heat.

Keywords: evaporators, crystallizing solutions boiling down, film flow of a multi-phase substance, efficiency improvement.

Руденко Н.О., аспірант, Лещенко С.А., к.техн.н., доцент, Коваленко Ю.І., к.техн.н.

КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТЯ Ni–V В ПРОЦЕСІ ВИДІЛЕННЯ ВОДНЮ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: водень, електроліз води, каталітична активність, катодний матеріал, покриття нікель-ванадій.

Вступ. Каталітична активність та стабільність роботи електродних матеріалів в значній мірі впливають на енергетичну ефективність електролізу води. [1–3].

З метою підвищення ефективності катодного процесу виділення водню замість недостатньо стійких вуглецевих сталей використовують сталеві електроди, модифіковані домішками хрому, ванадію, молібдену. Такі електроди є більш стійкими в лужних електролітах в присутності хлоридних та сульфатних іонів [4–6].

Катодні матеріали з таких сталей, виявляючи електрокаталітичну активність, забезпечують зменшення катодної перенапруги виділення водню, яка дозволяє зменшити напругу електролізу і енергетичні затрати на електроліз в цілому [7–12].

Виходячи з цього, було вирішено перевірити ефективність використання як катодного матеріалу сталі 20 з нанесеним на нього електрохімічним покриттям нікелем та сплавом Ni–V.

Методика експерименту. Покриття нікелем та сплавом нікель-ванадій осаджували на основу зі сталі 20 товщиною 12 мкм. Для осадження нікелевого покриття використовували стандартний сульфатний електроліт нікелювання такого складу (г/дм³): NiSO₄·7H₂O 250–300, H₃BO₃ 25–30, NaCl 15–20. Для осадження покриття Ni–V додатково вводили 0,1–0,3 г/дм³ ванадат-іону (в перерахунку на метал). Вміст ванадію в сплаві в залежності від густини струму визначали методом рентгеноструктурного аналізу за допомогою рентгенівського флуоресцентного спектрометра «СПРУТ» СЕФ–1.

Каталітичні властивості покриття Ni–V визначались за даними реакції відновлення водню у розчині 2,5 моль/дм³ NaOH + 0,02 моль/дм³ NaCl. Такі катоди розроблялися для використання в електрохімічному отриманні водню з алюмодеполяризуючим циклом.

Експериментальна частина. На рис. 1 наведені катодні потенціодінамічні залежності виділення водню на електродах зі сталі 20 без покриття, з нікелевим покриттям та покриттям сплавом Ni–V з середнім вмістом ванадію 0,45 %.

Характер отриманих залежностей свідчить, що виділення водню відбувається при потенціалах від –1,2 В до –1,4 В в діапазоні густин струму від 0,01 – 0,1 А/см². Від-

новлення водню на електроді з покриттям Ni-V починається при $E = -1,2$ В (рис. 1, кр. 3), з поляризацією на 50 мВ меншою в порівнянні з електродами зі сталі 20 без покриття та з нікелевим покриттям, на яких відновлення водню розпочинається при $E = -1,4$ В (рис. 1, кр. 1, 2). Стационарний потенціал виділення водню у розчині $2,5$ моль/дм³ NaOH + $0,02$ моль/дм³ NaCl (рН = 12) становить $-0,8$ В.

Значення потенціалу електроду з покриттям Ni-V залишається стабільним протягом всього часу електролізу при робочих густинах струму $j = 0,01 - 0,1$ А/см² та температурі $20-25$ °С так само, як і для електродів, що використовуються і в промисловому водно-лужному електролізі, і в процесі електрохімічного отримання водню з алюмодеполяризуючим циклом.

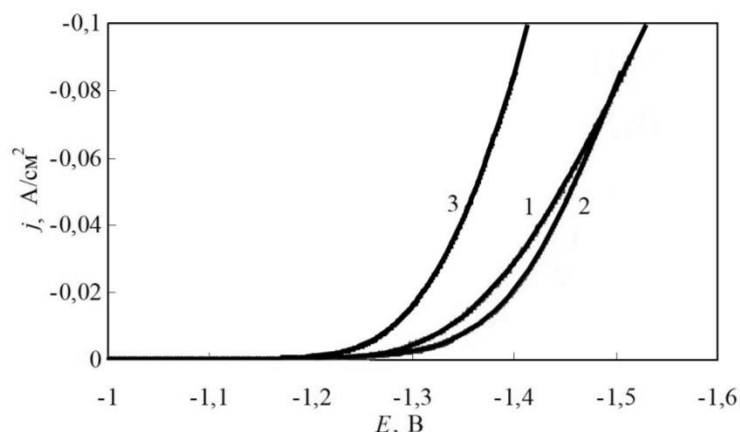


Рисунок 1 – Катодні потенціодинамічні залежності виділення водню у $2,5$ моль/ дм³ NaOH + $0,02$ моль/ дм³ NaCl на електродах зі сталі 20: 1 – без покриття; 2 – з нікелевим покриттям, 3 – з покриттям сплавом Ni-V

На рис. 2 наведені залежності виділення водню в координатах електрохімічної кінетики на електродах з покриттям Ni-V з вмістом ванадію $0,2$ % та $0,45$ %.

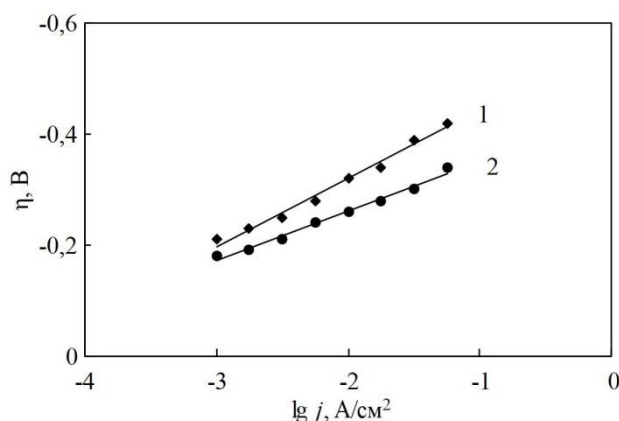


Рисунок 2 – Напівлогарифмічні залежності виділення водню у $2,5$ моль/ дм³ NaOH + $0,02$ моль/ дм³ NaCl на електродах з покриттям Ni-V, з вмістом ванадію, %: 1 – $0,2$, 2 – $0,45$

Емпіричні рівняння Тафеля для отриманих залежностей мають наступний вигляд: $\eta = -0,58 - 0,13 \cdot \lg j$ (рис.2, кр.1), $\eta = -0,47 - 0,1 \cdot \lg j$ (рис. 2, кр. 2), з яких видно, що збільшення вмісту ванадію в покритті призводить до зменшення перенапруги виділення водню і підвищення каталітичної активності електроду.

Подальше збільшення вмісту ванадію у сплаві призводить до порушення мікроструктурності структури і збільшення внутрішніх напружень одержаних осадів. Тому, для досліджень використовували електроди з покриттям Ni-V, вміст ванадію в яких складає 0,45 %.

Перенапруга виділення водню на електродах з електрокаталітичним покриттям Ni-V при стаціонарному електролізі з катодною густиною струму $j = 0,01-0,1 \text{ А/см}^2$ на 70–100 мВ нижча у порівнянні зі сталевими та нікельованими електродами. Тому електроди з покриттям сплавом Ni-V можна рекомендувати в якості катодного матеріалу при електрохімічному отриманні водню з метою зменшення енергетичних витрат на електроліз.

Висновки. Встановлено каталітичну активність електроду зі сталі 20 з покриттям сплавом Ni-V з вмістом ванадію 0,45 % по відношенню до реакції відновлення водню на катоді. Використання таких електродів призводить до зменшення перенапруги реакції на 70–100 мВ у порівнянні з перенапругою на електродах зі сталі 20 без покриття та з покриттям нікелем, що свідчить про доцільність використання електроду з покриттям Ni-V в якості катоду у водно-лужному електролізі. Робочий діапазон катодної густини струму складає $j = 0,01-0,1 \text{ А/см}^2$.

Література

1. Коваленко Ю.И., Байрачный Б.И., Мишина Е.Б. Электродные процессы на каталитических сплавах – железа с никелем, кобальтом, ванадием и титана с никелем // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 4 – С. 44–46.
2. Коваленко Ю. И., Воронина Е.В., Байрачный Б.И. Электродокаталитические свойства сплавов железа // Вестник НТУ "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Химия, химическая технология и экология. – Х.: НТУ "ХПИ". – 2012. – № 32. – С. 170–174.
3. Козін Л.Ф., Манілевич Ф.Д., Куций А.В. Дослідження залежності перенапруги виділення водню і кисню на різних металах від їх фізико-хімічних властивостей та вибір оптимальних деполяризаторів виділення водню та кисню з лужних розчинів //Тези доповідей наукової звітної сесії «Фундаментальні проблеми водневої енергетики».– К.: НАН України, 2010. С.1.
4. Козин Л.Ф., Волков С.В. Современная энергетика и экология. Проблемы и перспективы // Київ. “Наукова думка” НАН України. – 2006. – 272 с.
5. Ведь М.В., Сахненко М.Д. Каталітичні та захисні покриття сплавами і складними оксидами: електрохімічний синтез, прогнозування властивостей : монографія/ – Харків : НТУ «ХП», 2010. – 272 с.

6. Байрачний Б.І., Тульський Г.Г., Штефан В.В., Токарева І.А. Технічна електрохімія : Підручник: у 5 ч. – Ч 5 : Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин / Харків : Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2016. – С. 199–225.

7. Воронина Е.В., Коваленко Ю.И., Байрачний Б.И. Электродокаталитические свойства сплавов железа // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 32. – С. 170–174.

8. Shen T.F.R., Lai M.H., Yang T.C.K., Fu I.P., Liang N.Y., Chen W.T. Photocatalytic production of hydrogen by vanadium oxides under visible light irradiation // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2012. – Vol. 43. – Iss. 1. – P. 95–101.

9. Galloni P., Conte V., Floris B. A journey into the electrochemistry of vanadium compounds // Coordination Chemistry Reviews. – 2015. – Vol. 301–302. – P. 240–299.

10. Santos D.M.F., Sequeira C.A.C. Hydrogen production by alkaline water electrolysis // Quimica Nova. – 2013. – Vol. 36. – No. 8. – P. 1176–1193.

11. Gala J., Małachowski A., Nawrat G. Electrolytic nickel-molybdenum-vanadium alloy coatings as a material with a decreased hydrogen overvoltage // Journal of Applied Electrochemistry. – 1983. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 221–230.

12. Herraiz-Cardona I., Ortega E., Garcia-Anton J., Perez-Herranz V. Assessment of the roughness factor effect and the intrinsic catalytic activity for hydrogen evolution reaction on Ni-based electrodeposits // Int. J. Hydrogen. – 2011. – Vol. 36. – Iss. 16. – P. 9428–9438.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalenko Yu.I., Bajrachnyj B.I., Mishina E.B. Ehlektrodnye processy na kataliticheskikh splavakh – zheleza s nikel'm, kobal'tom, vanadiem i titana s nikel'm // Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii. – 2011. – № 4 – P. 44–46.

2. Kovalenko Yu. I., Voronina E.V., Bajrachnyj B.I. Ehlektrokataliticheskie svoystva splavov zheleza // Vestnik NTU "KHPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Khimiya, khimicheskaya tekhnologiya i ehkologiya. – KH.: NTU "KHPI". – 2012. – № 32. – P. 170–174.

3. Kozin L.F., Manilevych F.D., Kutsyi A.V. Doslidzhennia zalezhnosti perenapruhy vydilennia vodniu i kysniu na riznykh metalakh vid yikh fizyko-khimichnykh vlastyvostei ta vybir optymalnykh depoliaryzatoriv vydilennia vodniu ta kysniu z luzhnykh rozchyniv // Tezy dopovidei naukovoї zvitnoi sesii «Fundamentalni problemy vodnevoi enerhetyky». – K.: NAN Ukrainy, 2010. – P.1.

4. Kozyn L.F., Volkov S.V. Sovremennaia enerhetyka y ekolohiya. Problemi y perspektyvi // Kyiv. “Naukova dumka” NAN Ukrainy. – 2006. – 272 p.

5. Ved M.V., Sakhnenko M.D. Katalitychni ta zakhysni pokryttia splavamy i skladnymy oksydamy: elektrokhimichnyi syntez, prohnozuvannia vlastyvostei : monohrafiia / – Kharkiv : NTU «KhPI», 2010. – 272 p.

6. Bairachnyi B.I., Tul'skiy H.H., Shtefan V.V., Tokareva I.A. Tekhnichna elektrokhimiia : Pidruchnyk: u 5 ch. – Ch 5 : Suchasni khimichni dzherela strumu, elektroliz rozplaviv, elektrosyntez khimichnykh rehovyn / Kharkiv : Vyd-vo «Pidruchnyk NTU

“KhPI”», 2016. – P. 199–225.

7. Voronina E.V., Kovalenko Yu.I., Bajrachnyj B.I. Ehlektrokataliticheskie svojstva splavov zheleza // Visnik NTU «KHPI». – Kharkiv: NTU «KHPI». – 2012. – № 32. – P. 170–174.

8. Shen T.F.R., Lai M.H., Yang T.C.K., Fu I.P., Liang N.Y., Chen W.T. Photocatalytic production of hydrogen by vanadium oxides under visible light irradiation // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2012. – Vol. 43. – Iss. 1. – P. 95–101.

9. Galloni P., Conte V., Floris B. A journey into the electrochemistry of vanadium compounds // Coordination Chemistry Reviews. – 2015. – Vol. 301–302. – P. 240–299.

10. Santos D.M.F., Sequeira C.A.C. Hydrogen production by alkaline water electrolysis // Quimica Nova. – 2013. – Vol. 36. – No. 8. – P. 1176–1193.

11. Gala J., Małachowski A., Nawrat G. Electrolytic nickel-molybdenum-vanadium alloy coatings as a material with a decreased hydrogen overvoltage // Journal of Applied Electrochemistry. – 1983. – Vol. 14. – Iss. 2. – P. 221–230.

12. Herraiz-Cardona I., Ortega E., Garcia-Anton J., Perez-Herranz V. Assessment of the roughness factor effect and the intrinsic catalytic activity for hydrogen evolution reaction on Ni-based electrodeposits // Int. J. Hydrogen. – 2011. – Vol. 36. – Iss. 16. – P. 9428–9438.

УДК 661.96 : 621. 357; 621.35

Руденко Н.О., аспірант, Лещенко С.А., к.техн.н., доцент, Коваленко Ю.І., к.техн.н.

КАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТЯ Ni–V В ПРОЦЕСІ ВИДІЛЕННЯ ВОДНЮ

Сонячна та воднева енергетика відіграють важливу роль в забезпеченні різноманітних об'єктів промисловості електричною та тепловою енергією. Одним з пріоритетних напрямів сучасної промисловості є зростання об'ємів виробництва екологічно-безпечного джерела енергії – електрохімічного синтезу водню. Сучасні методи електролізу води не задовольняють потреби в його використанні, через високу собівартість електросинтезу водно-лужного електролізу, яка залежить від матеріало- та енергоємності електролізу.

Корисні витрати електроенергії для отримання енергоносія – водню на катоді і "непотрібні" витрати - на виділення кисню на аноді, залежать від перенапруги відповідних реакцій. Тому найважливішою проблемою водневої енергетики є синтез електродних матеріалів з малим перенапруженням виділення O_2 і H_2 . Електродні матеріали з низькою перенапругою дозволяють зменшити питомі витрати електроенергії при отриманні водню "класичним" електролізом.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено перспективність зниження катодної і анодної перенапруги, яка становить значну частину напруги на клеммах електролізера, для розробки високоефективних і конкурентоспроможних техно-

логій отримання водню низькотемпературним електролізом лужного розчину. Для зниження перенапруги катодного виділення водню запропоновано модифікувати поверхню катодів. Нанесення незначної кількості електролітичних сплавів металів сімейства заліза з молибденом і вольфрамом на нікелеві, кобальтові, титанові і сталеві електроди суттєво (на 40–50 %) знижує перенапругу катодного виділення на них водню з розчину лугу.

Використання сталевих електродів, поверхня яких модифікована ванадієм і кобальтом, дозволяє знизити падіння напругу на електролізері при електросинтезі H_2 і O_2 на 0,2–0,3 В, що створює умови зниження енергетичних витрат і економії електроенергії.

Ключові слова: водень, електроліз води, каталітична активність, катодний матеріал, покриття нікель-ванадій.

Руденко Н.А., аспірант, Лещенко С.А., к.техн.н., доцент, Коваленко Ю.И., к.техн.н.

КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ Ni-V В ПРОЦЕССЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА

Солнечная и водородная энергетика играют важную роль в обеспечении различных объектов промышленности электрической и тепловой энергией. Одним из приоритетных направлений современной промышленности является рост объемов производства экологически безопасного источника энергии – электрохимического синтеза водорода. Современные методы электролиза воды не удовлетворяют потребности в его использовании из-за высокой себестоимости электросинтеза водно-щелочного электролиза, которая зависит от материал- и энергоемкости электролиза.

Полезные расходы электроэнергии для получения энергоносителя - водорода на катоде и "ненужные" затраты - на выделение кислорода на аноде, зависят от перенапряжения соответствующих реакций. Поэтому важнейшей проблемой водородной энергетики является синтез электродных материалов с малым перенапряжением выделения O_2 и H_2 . Электродные материалы с низкой перенапряжением позволяют снизить удельные затраты электроэнергии при получении водорода "классическим" электролизом.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено перспективность снижения катодного и анодного перенапряжения, которая составляет значительную часть напряжения на клеммах электролизера, для разработки высокоэффективных и конкурентоспособных технологий получения водорода низкотемпературным электролизом щелочного раствора. Для снижения перенапряжения катодного выделения водорода предложено модифицировать поверхность катодов. Нанесение незначительного количества электролитических сплавов металлов семейства железа с молибденом и вольфрамом на никелевые, кобальтовые, титановые и стальные электроды существенно (на 40–50 %) снижает перенапряжение катодного выделения на них водорода из раствора щелочи.

Использование стальных электродов, поверхность которых модифицирована ва-

надием и никелем, позволяет снизить падение напряжение на электролизере при электросинтезе H_2 и O_2 на 0,2–0,3 В, создает условия снижения энергетических затрат и экономии электроэнергии.

Ключевые слова: водород, электролиз воды, каталитическая активность, катодный материал, покрытие никель-ванадий.

Rudenko N.A., Leshchenko S.A., Kovalenko Yu.I.

CATALYTIC PROPERTIES OF Ni-V COATING IN THE PROCESS OF HYDROGEN RELEASE

Solar and hydrogen energy play an important role in providing a variety of industrial facilities with electricity and heat. One of the priorities of modern industry is to increase the production of environmentally friendly energy source – electrochemical synthesis of hydrogen. Modern methods of electrolysis of water do not meet the need for its use, due to the high cost of electrosynthesis of water-alkaline electrolysis, which depends on the material and energy consumption of electrolysis.

The useful energy consumption for the production of energy – hydrogen at the cathode and "unnecessary" costs - for the release of oxygen at the anode, depend on the overvoltage of the respective reactions. Therefore, the most important problem of hydrogen energy is the synthesis of electrode materials with low overvoltage of O_2 and H_2 . Electrode materials with low overvoltage will reduce the specific consumption of electricity in obtaining hydrogen by "classical" electrolysis.

The prospects of reducing the cathodic and anodic overvoltage, which is a significant part of the voltage at the terminals of the cell, for the development of highly efficient and competitive technologies for hydrogen production by low-temperature electrolysis of an alkaline solution have been theoretically substantiated and experimentally confirmed. To reduce the overvoltage of the cathodic hydrogen evolution, it is proposed to modify the surface of the cathodes. The application of a small amount of electrolytic alloys of metals of the iron family with molybdenum and tungsten on nickel, cobalt, titanium and steel electrodes significantly (by 40–50 %) reduces the overvoltage of cathodic release of hydrogen from alkali solution.

The use of steel electrodes, the surface of which is modified with vanadium and nickel, reduces the voltage drop on the cell during the synthesis of H_2 and O_2 by 0.2–0.3 V, which creates conditions for reducing energy costs and energy savings.

Keywords: hydrogen, water electrolysis, catalytic activity, cathode material, nickel-vanadium coating.

Шевченко К.В., Григоров А.Б., к. техн. н., доцент,
Сінкевич І.В., к. техн. н., доцент

ВИЗНАЧЕННЯ КОРОЗІЙНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛ ПАЛИВА, ОТРИМАНОГО З ВТОРИННОЇ ПОЛІМЕРНОЇ СИРОВИНИ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: паливо, вторинна сировина, поліпропілен, корозійний вплив, мідна пластинка, температура, вода, динамічні умови, сірка.

Вступ. Корозійний вплив на метали, зокрема на мідні сплави, відноситься до числа найважливіших експлуатаційних характеристик палива, обов'язкове визначення якого регламентується нормативно-технічною документацією на паливо (ДСТУ, ТУ) [1]. При взаємодії металу з корозійно-активними речовинами палива відбувається їх ураження з утворенням продуктів, які є нерозчинними у паливі і здатні відкладатися на фільтруючих елементах паливної системи, порушуючи її працездатність. Отже, від корозійного впливу на метали палива залежить надійна та довговічна експлуатація паливної апаратури як окремих вузлів, так і системи в цілому.

Мета та постановка задачі дослідження. Корозійно-активні речовини (водорозчинні мінеральні кислоти та луги, активні сірчані сполуки, вода, органічні кислоти) є невід'ємними елементами природної нафтової сировини з якої виробляються палива [2, 3]. Вони здатні потрапляти у товарні палива при їх виробництві (як при штатному режимі, так і при аварійних ситуаціях), зберіганні та транспортуванні.

Сьогодні, з метою зниження собівартості товарних продуктів, з одночасним підвищенням рівня їх якості, досить активно ведуться роботи по залученню вторинної сировини до технологічного процесу виробництва різних видів палив. Основною альтернативою до нафтової сировини виступає полімерна, що представлена відпрацьованими виробами з поліетиленів, поліпропілену та полістиролу [4–7].

Зважаючи на це, до числа завдань, які необхідно вирішити до промислового впровадження технологій отримання палив з вторинної полімерної сировини відноситься визначення їх корозійного впливу на метали.

У відповідності до [8] визначення корозійного впливу на метали здійснюється у статичних умовах при температурі 50 °С на протязі 180 хв., з використанням спеціально підготовленої мідної пластини встановлених розмірів. Відомо, що мідь та її сплави, в наслідок своєї каталітичної дії на протікання процесу окиснення в яких беруть участь корозійно-активні речовини палива, сприяє інтенсифікації процесу корозії на поверхні пластини. Тобто, процес корозії мідної пластини, яка використовується у дослідженні, протікає, з так званим, автокатолітичним прискоренням [9].

На нашу думку, стандартизований метод визначення корозійного впливу палива та мідну пластинку, потребує певного удосконалення. Так, у стандартизованому методі не передбачено примусове перемішування дослідженого палива, що зумовлює контакт обмеженого об'єму палива з мідною пластинкою. В наслідок цього, зменшується корозійний вплив палива на пластину а для отримання більш-менш стійкого та вагомого результату необхідно проводити тривалі дослідження (до 180 хв.). Отже, удосконалити стандартизований метод, можна шляхом скорочення тривалості проведення дослідження, шляхом створення динамічних умов – омивання мідної пластини значним об'ємом досліджуваного палива при певних швидкостях. Крім цього, такий підхід буде моделювати реальні умови, які виникають при виконанні зливно-наливних робіт або безпосередньо при використанні палива.

Експериментальні дослідження. Дослідження корозійного впливу на мідну пластину проводилось для зразків палива (діапазон википання 200–360 °С), що отримано з вторинної поліпропіленової сировини, шляхом її термічної деструкції та подальшим фракціюванням отриманих продуктів [10].

Для цього, нами було розроблено лабораторну установку (див. рис. 1), яка дозволяє визначати корозійний вплив палива на мідну пластинку у динамічних умовах: температура дослідження від 20 °С до 100 °С; кількості палива, що прокачується, від 4,0 дм³/хв. до 20 дм³/хв.

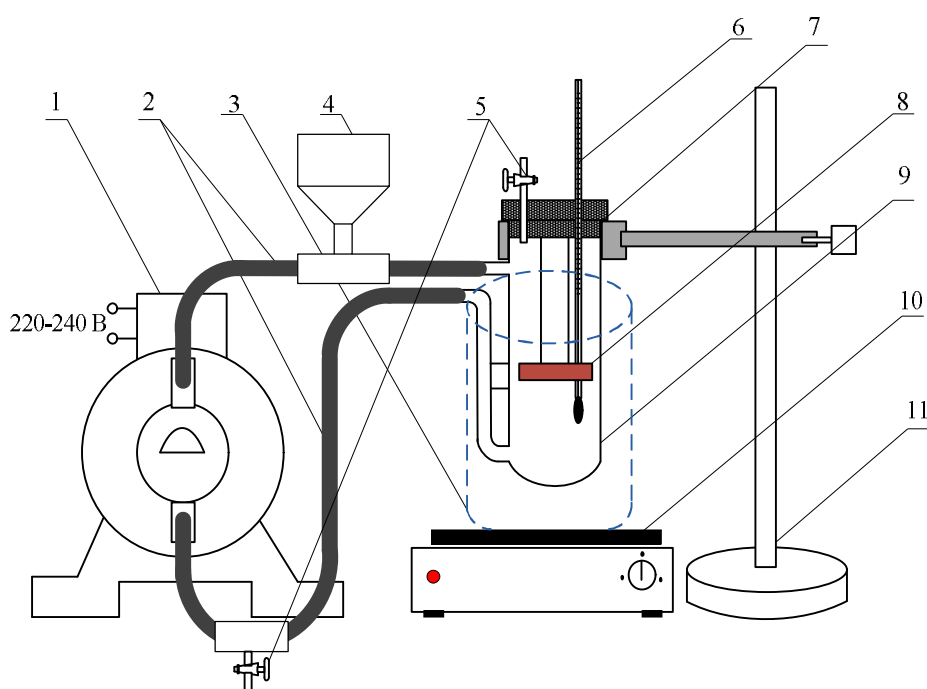


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки: 1 – насос; 2 – патрубки; 3 – стакан; 4 – розширювальний бачок ; 5 – крани; 6 – термометр; 7 – кришка; 8 – мідна пластинка; 9 – колба; 10 – електрична плитка; 11 – штатив

Дослідження проводилися у наступний спосіб: підготовлена мідна пластинка (8) розташовувалась у внутрішній колбі (9), заповненій випробуваним паливом ($V=2,5 \text{ дм}^3$) та закріпленої на штативі (11). Колба (9) знаходилася у зовнішньому стакані (3), заповненому теплоносієм (у даному випадку вазеліновою оливою), який встановлювався на електричну плитку (10). Далі здійснювалася циркуляція палива завдяки паливному насосу (1) при постійному підігріві до необхідної температури дослідження яка реєструвалася за допомогою термометру (6). У конструкції насоса передбачено фільтруючий елемент для запобігання потрапляння до внутрішньої колби механічних домішок. Після термостації відбувалася витримка мідної пластини у досліджуваному паливі. Загальна тривалість дослідження складала 80 хв. Далі пластину виймали, промивали розчинником (петролейний ефір), просушували знезоленим фільтром і перевіряли наявність потм'яніння або корозії. Кількість циклів випробувань складала, не менше ніж 3.

Відомо, що інтенсифікація корозійних процесів металевих процесів при контакті з паливом, відбувається у присутності води [11, 12]. Вміст води у паливі не повинен перевищувати 0,02 %, але, у деяких випадках, особливо при зберіганні та транспортуванні палива, ця межа може значно перевищуватися. Дослідження впливу води у паливі на його корозійний вплив по відношенню до мідної пластинки, досліджувався на лабораторній установці, що наведена на рис. 2.

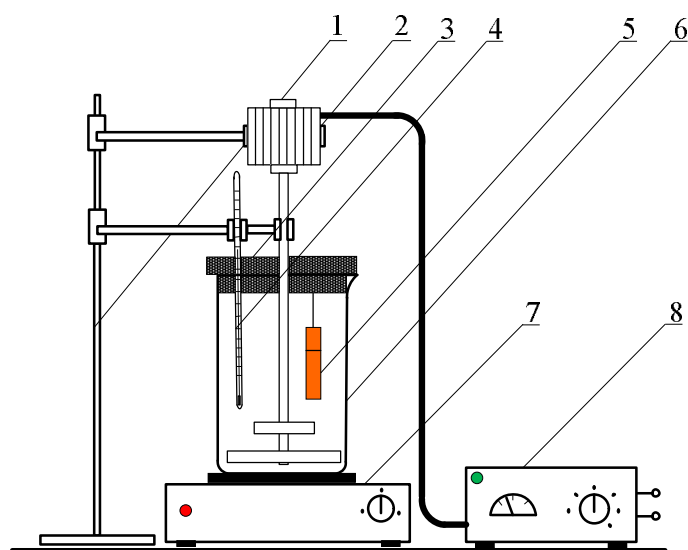


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки: 1 – штатив; 2 – електричний перемішувач; 3 – кришка; 4 – термометр; 5 – мідна пластинка; 6 – стакан; 7 – електрична плитка; 8 – блок керування

Дослідження проводилися у наступний спосіб: підготовлена мідна пластинка (5) розташовувалась у стакані (6), заповненому випробуваним паливом ($V=1,0 \text{ дм}^3$). Стакан (6), встановлювався на електричну плитку (7). Перемішування обводненого палива задля запобігання руйнування утвореної емульсії, здійснювалося завдяки електричному перемішувачу пропелерного типу (2), який закріплено на штативі (1). Реєстрація температури палива здійснювалася за допомогою термометру (3) а керування швидкості обертання електричного перемішувача (2) – за допомогою блоку

керування (8). Після термостації відбувалася витримка мідної пластини у досліджуваному паливі при заданій температурі дослідження. Загальна тривалість дослідження складала 80 хв. Далі пластину виймали, промивали розчинником (петролейний ефір), просушували знезоленим фільтром і перевіряли наявність потм'яніння або корозії. Кількість циклів випробувань складала, не менше ніж 3.

Результати досліджень: залежність корозійного впливу на мідну пластину, виражену у балах класифікації еталонів від температури дослідження ($t, ^\circ\text{C}$), кількості палива ($Q, \text{дм}^3/\text{хв.}$), що прокачується крізь внутрішню колбу та вмісту води ($w, \%$), представлено на рис. 3а, 3б та 3в, відповідно.

Проведені дослідження показали, що досліджуване паливо, що отримане з вторинної полімерної сировини не чинить корозійного впливу на мідну пластинку, навіть при вмісті у ньому води на рівні 1,0 %. Це пояснюється відсутністю у складі полімерної сировини та отриманого з неї палива, водорозчинних мінеральних кислот та лугів, активних сірчаних сполук та органічних кислот.

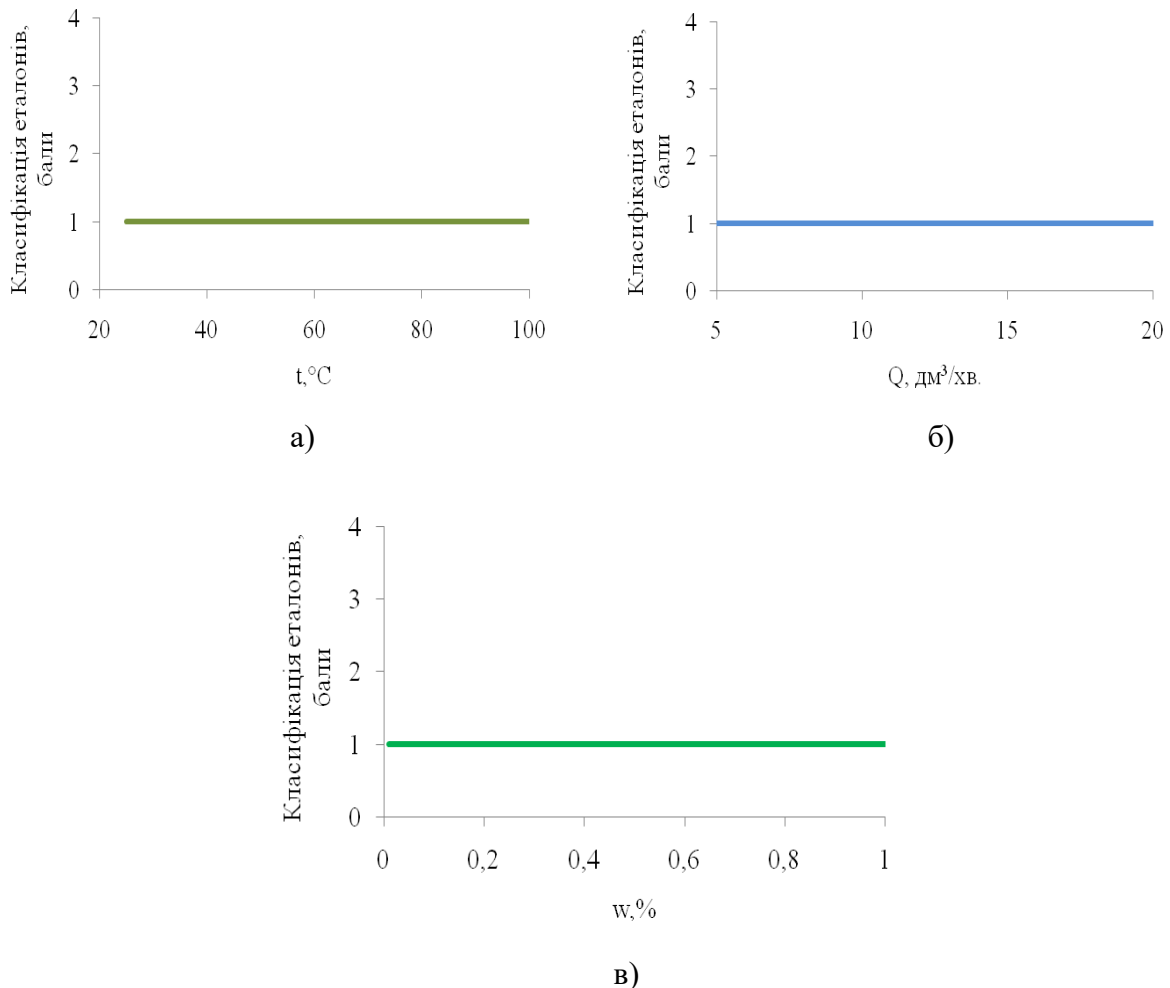


Рисунок 3 – Результати лабораторних досліджень:

- а) залежність корозійного впливу від t ; б) залежність корозійного впливу від Q ;
в) залежність корозійного впливу від w

Але у полімерній сировині, у вигляді забруднення при порушенні технології сортування, коли серед поліолефінової сировини зустрічається гума та полівінілхлорид (ПВХ), у паливі можуть зустрічатися сірковмісні і хлорвмісні сполуки, які характеризуються високою корозійною активністю. У цьому випадку виникає необхідність розроблення комплексу заходів по їх видаленню зі складу палива під час його промислового виробництва та захисту навколишнього середовища від шкідливих газоподібних викидів.

Висновки. У ході проведених досліджень запропоновано метод визначення корозійного впливу палива на мідну пластинку у динамічних умовах – омивати мідну пластинку значним об'ємом досліджуваного палива при певних швидкостях і температурі. Він дозволяє проводити дослідження у широкому діапазоні температур а також значно скоротити тривалість дослідження у порівнянні зі стандартизованим методом.

Встановлено, що паливо (200–360 °С), отримане при термічній деструкції вторинної поліпропіленової сировини не чинить корозійного впливу на мідну пластинку незалежно від температури дослідження ($t, ^\circ\text{C}$), кількості палива ($Q, \text{дм}^3/\text{хв.}$), що прокачується крізь колбу з пластиною та вмісту води ($w, \%$). Це свідчить про відсутність у паливі сірковмісних і хлорвмісних сполук, які характеризуються високою корозійною активністю. Отже, досліджуване паливо є придатним для отримання на його базі нових видів синтетичного палива, аналога класичних нафтопродуктів. Таке паливо за своїми експлуатаційними властивостями буде повністю відповідати вимогам стандарту екологічної безпеки, прийнятого у країнах Європейського Союзу.

Література

1. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне ЄВРО. Технічні умови. / Український науково-дослідний інститут нафтопереробної промисловості «МАСМА» (УкрНДІНП «МАСМА»). Дата початку дії 01.01.2016. – 16 с.
2. Teresa E. Perez. Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials / Teresa E. Perez. // International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – Vol. 65. – pp. 1033–1042.
3. Alec Groysman. Corrosion problems and solution in oil refining and petrochemical industry / Alec Groysman. Springer, Dordrecht, 2016. – 356 p.
4. Gasoline and Diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite / Chantal Kassargy et al. // Fuel – 2018. – № 224. – pp. 764–773.
5. Rachmadena D. Conversion of Polypropylene Plastic Waste Into Liquid Fuel with Catalytic Cracking Process Using Al_2O_3 as Catalyst / D. Rachmadena, M. Faizal, M. Said // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2018. – Vol.8. – No. 3. – pp. 694–700.
6. Sarker M. Alternative diesel grade fuel transformed from polypropylene (pp) municipal waste plastic using thermal cracking with fractional column distillation / M. Sarker, M. M. Mamunor, M. Sadikur Rahman, M. Molla // Energy and power engineering. – 2012. – vol. 4. – pp. 165–172.

7. Brajendra K. Sharma. Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags / B.K. Sharma, B.R. Moserb, K.E. Vermillionb, Kenneth M. Dollb, Nandakishore Rajagopalan. // Fuel Processing Technology. – 2014. – Volume 122. – pp. 79–90.
8. ДСТУ ISO 2160:2012. Нафтопродукти. Метод визначення корозійної дії на мідну пластинку / Український науково-дослідний інститут нафтопереробної промисловості «МАСМА» (УкрНДІНП «МАСМА»). Дата початку дії 01.01.2015. – 15 с.
9. Кондратенко В.В. Метод оценки коррозионной активности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях / В.В. Кондратенко, И.М. Никитин, В.В. Сузиков // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2015. – №217. – С. 103–107.
10. Grigorov Andrey. Production of boiler and furnace fuels from domestic wastes (polyethylene items) / Andrey Grigorov, Aleksey Mardupenko, Irina Sinkevich, Alena Tulskaaya, Oleg Zelenskiy // Petroleum & Coal journal. – 2018. – Volume 60. – Issue 6. – pp. 1149–1153.
11. Doiron A. Effect of hydrocarbons on the internal corrosion of oil and gas pipelines / A. Doiron; T. Panneerselvam; R. W. Revie // CORROSION. – 2007. – Vol. 63. – Issue 7. – pp. 704–712.
12. Fazal M.A. Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials / M. A. Fazal, A. Haseeb, H. Masjuki // Materials Science. – 2010. – Vol. 91. – Issue 10. – pp. 1308–1315.

Bibliography (transliterated)

1. DSTU 7688:2015. Palivo dizel'ne ЄVRO. Tekhnichni umovi. / Ukraïns'kij naukovo-doslidnij institut naftopererobnoï promislovosti «MASMA» (UkrNDINP «MASMA»). Data pochatku diï 01.01.2016. – 16 p.
2. Teresa E. Perez. Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials / Teresa E. Perez. // International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – Vol. 65.– pp. 1033–1042.
3. Alec Groysman. Corrosion problems and solution in oil refining and petrochemical industry / Alec Groysman. Springer, Dordrecht, 2016. – 356 p.
4. Gasoline and Diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite / Chantal Kassargy et al. // Fuel – 2018. – № 224. – pp. 764–773.
5. Rachmadena D. Conversion of Polypropylene Plastic Waste Into Liquid Fuel with Catalytic Cracking Process Using Al₂O₃ as Catalyst / D. Rachmadena, M. Faizal, M. Said // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2018. – Vol.8. – No. 3. – pp. 694–700.
6. Sarker M. Alternative diesel grade fuel transformed from polypropylene (pp) municipal waste plastic using thermal cracking with fractional column distillation / M. Sarker, M. M. Mamunor, M. Sadikur Rahman, M. Molla // Energy and power engineering. – 2012. – vol. 4. – pp. 165–172.
7. Brajendra K. Sharma. Production, characterization and fuel properties of alternative diesel fuel from pyrolysis of waste plastic grocery bags / B.K. Sharma, B.R. Moserb, K.E.

Vermillionb, Kenneth M. Dollb, Nandakishore Rajagopalan.// Fuel Processing Technology. – 2014. – Volume 122. – pp. 79–90.

8. DSTU ISO 2160:2012. Naftoprodukti. Metod viznachennya korozijnoi dii na mīdnu plastinku / Ukraїns'kij naukovo-doslidnij institut naftererobnoi promislivosti «MASMA» (UkrNDINP «MASMA»). Data pochatku dii 01.01.2015. – 15 p.

9. Kondratenko V.V. Metod ocenki korrozionnoj aktivnosti topliv dlya reaktivnyh dvigatelej v dinamicheskikh usloviyah / V.V. Kondratenko, I.M. Nikitin, V.V. Suzikov // Nauchnyj Vestnik MGTU GA. – 2015. – №217. – P. 103–107.

10. Grigorov Andrey. Production of boiler and furnace fuels from domestic wastes (polyethylene items) / Andrey Grigorov, Aleksey Mardupenko, Irina Sinkevich, Alena Tulskaaya, Oleg Zelenskiy // Petroleum & Coal journal. – 2018. – Volume 60. – Issue 6. – pp. 1149–1153.

11. Doiron A. Effect of hydrocarbons on the internal corrosion of oil and gas pipelines / A. Doiron; T. Panneerselvam; R. W. Revie // CORROSION. – 2007. – Vol. 63. – Issue 7. – pp. 704–712.

12. Fazal M.A. Comparative corrosive characteristics of petroleum diesel and palm biodiesel for automotive materials / M. A. Fazal, A. Haseeb, H. Masjuki // Materials Science. – 2010. – Vol. 91. – Issue 10. – pp. 1308–1315.

УДК 662.75

Шевченко К.В., Григоров А.Б., к. техн. н., доцент, Сінкевич І.В., к. техн. н., доцент

ВИЗНАЧЕННЯ КОРОЗІЙНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛ ПАЛИВА, ОТРИМАНОГО З ВТОРИННОЇ ПОЛІМЕРНОЇ СИРОВИНИ

В статті запропоновано визначати корозійний вплив на метали палива у динамічних умовах тобто, при омиванні підготовленої мідної пластинки певного розміру, значним об'ємом досліджуваного палива при певних швидкостях і температурі дослідження. Такий підхід дозволить значно скоротити тривалість проведення дослідження (до 100 хв.) та є більш наближеним до реальних умов застосування палива, у порівнянні, зі стандартизованим методом, який сьогодні широко застосовується.

Використовуючи запропоновану лабораторну установку, дослідженню підвергалося паливо (200–360 °С), яке було отримане при термічній деструкції вторинної полімерної сировини, зокрема поліпропіленової. Отримані результати показали, що досліджуване паливо, незважаючи на температуру, кількість циркулюючого палива та вміст у ньому води не оказує корозійного впливу на мідну пластинку, що можна пояснити відсутністю корозійно-активних речовин у складі палива: водорозчинних мінеральних кислот та лугів, активних сірчаних сполук та органічних кислот. Але слід враховувати, що у поліолефіновій сировині, у вигляді забруднення, можуть бути присутні вироби з інших матеріалів, наприклад, гуми та полівінілхлориду. Це може статися при порушенні технології сортування або при попередній підготовки сировини і, у свою чергу,

сприятиме збільшенню у паливі сірковмісних та хлорвмісних сполук, які характеризуються високою корозійною активністю і підлягають обов'язковому видаленню зі складу палива.

Зауважмо, що паливо, отримане з вторинної полімерної сировини, за умов відсутності сірковмісних та хлорвмісних сполук, є досить перспективним для створення на його базі сучасних синтетичних палив, аналогів класичних нафтопродуктів.

Ключові слова: паливо, вторинна сировина, поліпропілен, корозійний вплив, мідна пластинка, температура, вода, динамічні умови, сірка.

Шевченко К.В., Григоров А.Б., Синкевич И.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛ ТОПЛИВА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ

В статье предложено определять коррозионное воздействие на металлы топлива в динамических условиях есть, при омывании подготовленной медной пластинки определенного размера, значительным объемом исследуемого топлива при определенных скоростях и температуре испытания. Такой подход позволит значительно сократить продолжительность проведения исследования (до 100 мин.) и является более приближенным к реальным условиям применения топлива, по сравнению, со стандартизированным методом, который сегодня широко применяется.

Используя предложенную лабораторную установку, исследованию подвергалось топливо (200–360 °С), которое было получено при термической деструкции вторичного полимерного сырья, в частности полипропиленовой. Полученные результаты показали, что топливо, несмотря на температуру, количество циркулирующего топлива и содержание в нем воды не оказывает коррозионного воздействия на медную пластинку, что можно объяснить отсутствием коррозионно-активных веществ в составе топлива: водорастворимых минеральных кислот и щелочей, активных серных соединений и органических кислот. Но следует учитывать, что в полиолефиновом сырье, в виде загрязнения, могут присутствовать изделия из других материалов, например, резины и поливинилхлорида. Это может произойти при нарушении технологии сортировки или при предварительной подготовке сырья и, в свою очередь, будет способствовать увеличению в топливе серосодержащих и хлорсодержащих соединений с высокой коррозионной активностью, которые подлежат обязательному удалению из состава топлива.

Заметим, что топливо, полученное из полимерного сырья, при отсутствии в нем серосодержащих и хлорсодержащих соединений, является весьма перспективным для создания на его базе современных синтетических топлив, аналогов классических нефтепродуктов.

Ключевые слова: топливо, вторичное сырье, полипропилен, коррозионное воздействие, медная пластинка, температура, вода, динамические условия, сера.

Chevchenko K.V., Grigorov A.B., Sinkevich I.V.

**DETERMINATION OF CORROSION INFLUENCE ON FUEL METAL,
OBTAINED FROM SECONDARY POLYMER RAW MATERIALS**

The article proposes to determine the corrosion effect on fuel metals under dynamic conditions, when washing the prepared copper plate of a certain size, a significant amount of fuel at a certain speed and temperature of the study. This approach will significantly reduce the duration of the study (up to 100 minutes) and is closer to the real conditions of contact of the fuel with a metal surface, in comparison with the standardized method, which is widely used today.

Using the proposed laboratory setup, the study was subjected to fuel (200–360 °C), which was obtained by thermal destruction of secondary polymer raw materials, in particular polypropylene. The obtained results showed that the investigated fuel, despite the temperature, the amount of circulating fuel and its water content, does not have a corrosive effect on the copper plate, which can be explained by the absence of corrosive substances in the fuel: water-soluble mineral acids and alkalis, active sulfur compounds and organic acids. However, it should be kept in mind that in polyolefin raw materials, in the form of contamination, there may be products made of other materials, such as rubber and polyvinyl chloride. This can happen when the sorting technology is violated or during the preliminary preparation of raw materials and, in turn, will contribute to the increase in sulfur-containing and chlorine-containing compounds in the fuel, which are characterized by high corrosion activity and should be necessarily removed from the fuel.

Note that the fuel obtained from secondary polymer raw materials, in the absence of sulfur-containing and chlorine-containing compounds, is quite promising for the creation on its basis of modern synthetic fuels, analogues of classic petroleum products.

Keywords: fuel, secondary raw materials, polypropylene, corrosion effect, copper plate, temperature, water content, dynamic conditions, sulfur.

Перевалов Л.І., к.техн.н., професор, Голодняк В.О., к.техн.н., консультант,
Демидов І.М., д.техн.н., професор, Тимченко В.К., к.техн.н., професор,
Півень О.М., к.техн.н., професор, Мольченко С.М., к.техн.н., доцент

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРУШУВАННЯ ВИСОКООЛІЙНОГО СОНЯШНИКУ В УМОВАХ ДІЇ ВІДЦЕНТРОВОГО ПОЛЯ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків,
Україна*

Ключові слова: високоолійний соняшник, морфологія та хімічний склад насіння, мінусові температури, обрушування, відцентрова дія.

Вступ. У 60-ті роки минулого століття, завдяки науковим розробкам академіка В.В. Пустовойта та його послідовників відбулись революційні зміни у сировинній базі соняшникової олії. В результаті селекції соняшнику було одержано високоолійний сорт соняшнику (олійність насіння зросла з 36-37 % до 52-54 %), а вихід олії з нього збільшився майже вдвічі [1, 2].

Насіння високоолійних сортів і гібридів соняшнику має особливості морфології, а саме: менший розмір насіння, менша (400→100 мкм) товщина оболонки; вона стала більш еластичною.

Аналогічні зміни відбулись також зі структурними елементами плодової оболонки. Так, стали більш тонкими так звані склеренхими, що складаються з товстостінних клітин, розташованих уздовж довгої осі насінини і мають добре виражену систему мікроканалів. Склеренхими визначають міцнісні характеристики лушпиння. Подібні зміни характерні і для менш міцних паренхимних рядів, які пронизують склеренхиму у радіальному напрямку [1, 3, 4].

Скоротився, а, в деяких випадках майже повністю зник повітряний прошарок між ядром і плодовою оболонкою, що спричинило зростання механічного зв'язку між ними і збільшило роботу руйнування насіння.

Іншим, у порівнянні зі звичайними сортами соняшнику, виявився біохімічний склад плодової оболонки та її структурних елементів.

Найважливішими хімічними компонентами клітин склеренхими і паренхимних рядів є високомолекулярні вуглеводи (целюлоза, геміцелюлоза, пектин, лігнін).

Довгі нерозгалужені кристалічні молекули целюлози агреговані у пучки – мікрофібрили, які містяться в матриці, що складається з геміцелюлоз і пектинів.

Наявність целюлозної основи обумовлює механічну міцність і еластичність плодової оболонки.

Між волокнами целюлози укорінюються молекули лігніну, інструють їх та надають клітинній оболонці значної пружності і твердості.

Наявність в лігнін різноманітних полярних груп і вуглеводневих радикалів дозволяє вважати його сорбентом із діфільними властивостями; поверхня такого сорбенту здатна взаємодіяти як з вологою, так і з ацилгліцеридами олії [1, 5].

Лушпиння високо олійних сортів і гібридів містить 61-72 % целюлози та 25-30 % лігніну [6].

До складу плодової оболонки високо олійного соняшнику входить до 3,0-3,9 % білків.

Таким чином, основна структуроутворююча частина плодової оболонки високо олійного соняшнику має гідрофільний характер.

Масова частка неполярних ліпідів у плодовій оболонці високо олійного насіння майже у 3 рази вище і складає 2,7-5,0 % [7, 8]. До складу ліпідів входять: 1,6-2,3 % олії, 60 % воскоподібних речовин ($t_{пл.} \sim 76,5 \text{ }^\circ\text{C}$) і 15-24,0 % неомилених речовин [7].

Зазначені вище особливості морфології та біохімічного складу плодової оболонки насіння високоолійного соняшнику утруднюють зберігання і технологію його переробки і, перш за все, технологію обрушування.

За причини зменшення повітряного прошарку між оболонкою та ядром та підвищення еластичності оболонки змінився механізм руйнування насіння високо олійного насіння соняшнику. Насіння сучасної селекції сприймають силу удару під час обрушування усіма частинами насінини (оболонкою та ядром одночасно). В результаті зріс вихід подрібненого ядра, січки та олійного пилу. Як наслідок, знизився ступінь обрушування, частка лушпиння у ядровій фракції збільшилась до 12-15,0 %, що спричинило погіршення якості пресової олії.

Подолання основних технологічних недоліків високоолійного насіння соняшнику під час обрушування виявилось можливим завдяки інноваційній технології обрушування насіння в охолодженому до мінусових температур стані, яку розроблено на кафедрі технології жирів та продуктів бродіння НТУ «ХП» [9, 10].

За умови використання цієї технології досягнуто якісного обрушування (до 95-100,0 %) за один прохід високоолійного насіння широкого фракційного складу через відцентрову насіннерушку [9], насіння з мінімальним прошарком або без нього [11] в інтервалі вологості від 1-3 до 10-15 [9, 12]. З'явилась також можливість вирішувати нетрадиційні технологічні задачі [13, 14].

В процесі пошуку раціональних умов обрушування за новою технологією детально вивчено вплив вологості (W-фактора), сили удару насіння об деку (N-фактора) та напрямку удару (гострим або тупим кінцем, Q_r-фактора орієнтації) [12, 13, 14].

Роль мінусових температур у запропонованій технології вивчено недостатньо; роль вологості під час обрушування насіння у замороженому стані також потребує додаткових досліджень.

Постановка проблеми. Метою даного дослідження є розширення теоретичних уявлень щодо механізму руйнування плодової оболонки під час обрушування високо олійного насіння за умови мінусових температур та дослідження можливості керування цим технологічним процесом.

У відповідності із зазначеною метою сформульовано наступні задачі дослідження:

- вибрати об'єкт дослідження та дослідити його технологічні властивості;
- визначити експериментальні та розрахункові показники процесу обрушування за умови мінусових температур;
- теоретичне осмислення та узагальнення результатів експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу досліджень

Об'єктом дослідження вибрано сорт високоолійного соняшнику Український F1, що мав тонкий повітряний прошарок між ядром та оболонкою ($7 \pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм) та середню товщину плодової оболонки ($0,35 \pm 0,011$ мм) [11].

З початкової суміші насіння на щілинних ситах відокремлено робочу фракцію насіння 3,2-3,4 мм, вміст якої склав 26,7 %.

Основні технологічні показники робочої фракції насіння наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технологічні показники фракції 3,2-3,4 мм насіння соняшнику Український F1

Фракція насіння, мм	Лушпинчатість, % мас.	Вміст ядра, % мас.	Початкова вологість, % мас.			Маса 1000 шт., г	Вміст фракції у початковій суміші, % мас.
			6,0	4,7	10,8		
3,2-3,4	26,4	73,6	6,0	4,7	10,8	77,0	26,7

Зазначену робочу фракцію методом діагонального поділу розділено на 2 частини, одну з яких висушили до вологості 1,0 % мас. (вологість ядра 0,68, а лушпиння 1,79 % мас.).

Підготовлена таким чином фракція позиціонована в роботі як «суха». Її охолоджували дією рідкого азоту в інтервалі температур 0 – мінус 196 °С.

Обрушування насіння чинили методом однократного спрямованого удару за один прохід скрізь насіннерушку 2- Іхно за умови швидкостей ротору $\omega=20,0; 23,3$ і $26,7 \text{ c}^{-1}$ [15, 16, 17].

Експериментальні дані щодо характеристики процесів обрушування сухого насіння представлено у вигляді температурних залежностей коефіцієнта обрушування (K_0) і коефіцієнта збереження цілого ядра ($K_{з.я.}$), які характеризують ступінь руйнування плодової оболонки і вихід цілого ядра (рис. 1а, 1б).

З рис. 1а видно, що коефіцієнт обрушування сухого насіння ($K_0^{1,0}$) у досліджуваному інтервалі температур (від 0 до -196 °С) близький до максимального ($K_0^{1,0}=0,90-0,99$) та залежить від температури та швидкості обертання ротору. Причому, за умови $\omega_{\max}=26,7 \text{ c}^{-1}$ граничне значення $K_0^{1,0}=0,99$ залишається незмінним як за температури +10 °С, так і за мінусових температур.

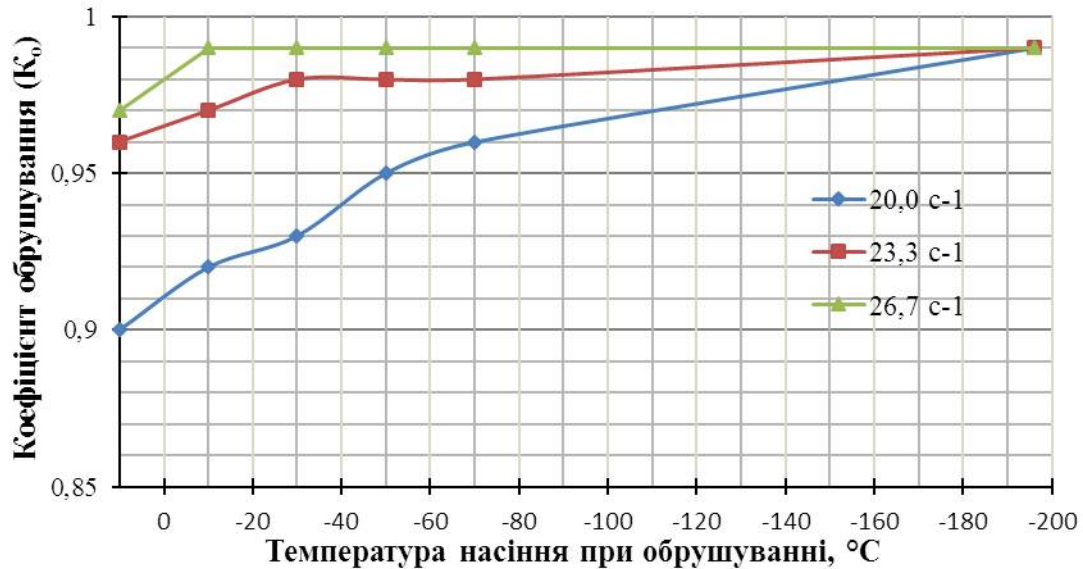


Рисунок 1а – Вплив температури насіння при оброщуванні соняшнику вологістю 1,0% на коефіцієнт оброщування (K_0) при зміні швидкості обертання ротору

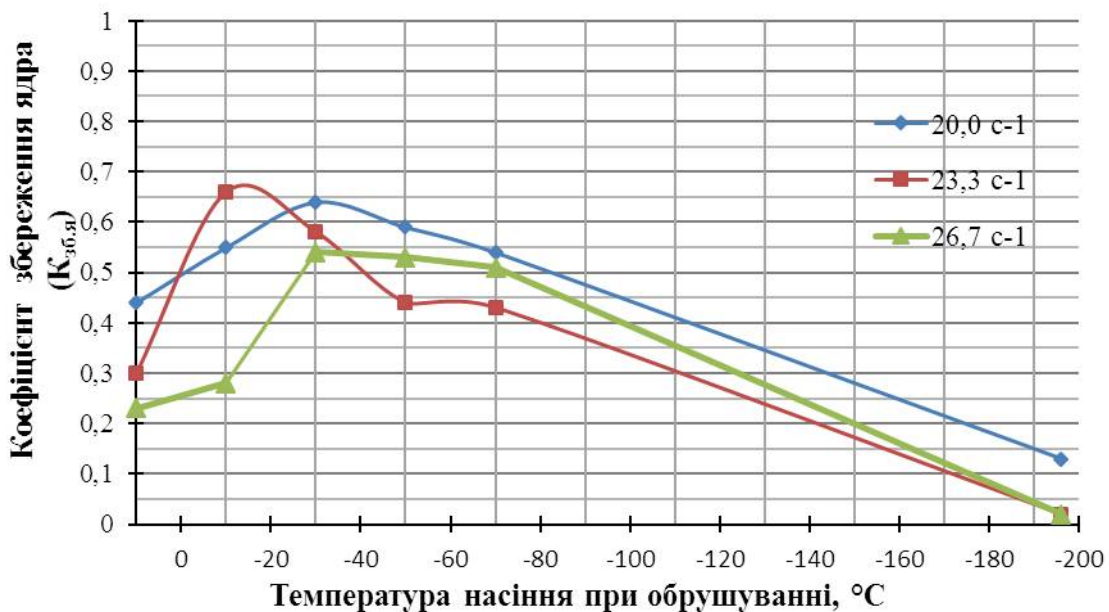


Рисунок 1б – Вплив температури насіння при оброщуванні соняшнику вологістю 1,0% на коефіцієнт збереження ядра ($K_{зб.я}$) при зміні швидкості обертання ротору

На перший погляд здається, що якісного оброщування можна досягти і без заморожування. Але детальний аналіз складу рушанок (за умови $K_0^{1,0}=0,99$) щодо виходу січки та олійного пилу виявляє суттєву різницю. Так, зниження температури з $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ спричиняє зменшення виходу січки у 2,3 рази, а олійного пилу у 2,8 рази. Мінімальні значення цих величин спостерігаються в інтервалі температур $-30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Але за умови граничної мінусової температури $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\omega=26,7\text{ с}^{-1}$ спостерігаються максимальні значення виходу січки (29,8 %) та олійного пилу (18,3 %).

Таким чином, показано, що раціональними умовами оброщування сухого насіння, які дозволяють досягнути граничну глибину оброщування ($K_0^{1,0}=0,99$) за умови мі-

німальних виходів січки та олійного пилу, є температура охолодження в інтервалі -30 – -50 °C і швидкість обертання насіннерушки $\omega=26,7$ с⁻¹.

Теоретичні тлумачення та узагальнення результатів дослідження

У теперішній час процес обрушування високоліїного насіння соняшнику методом однократного спрямованого удару за плюсових температур досліджено достатньо повно як для статичних, так і для динамічних умов [15].

Намагання застосувати виявлені закономірності до процесу обрушування за умови мінусових температур стикається з серйозними труднощами. Головною перешкодою є відсутність необхідних даних щодо фізико-механічних властивостей плодової оболонки та її біохімічних складових, а тим більше зміни цих властивостей за мінусових температур.

За цих умов під час аналізу експериментальних даних введено ряд припущень і спростувань, зокрема конкретні фізико-механічні властивості (міцність, пластичність, крихкість) замінено узагальненим показником «комплекс фізико-механічних властивостей». Було прийнято, що мінусові температури і швидкість обертання ротору під час обрушування впливають на фізико-механічні властивості насіння незалежно. І, нарешті, фізико-механічні (пружно-пластичні) показники насіння можна представити у вигляді адитивної суми цих показників для структурних складових цього насіння.

Раніше було відмічено, що основою «каркасу міцності» плодової оболонки є волокнисті структури целюлози. Тому однією з основних причин зростання коефіцієнту обрушування сухого насіння під час переходу від плюсових до мінусових температур є зміна базових фізико-хімічних властивостей целюлозних волокон з твердою адсорбційною поверхнею в бік підвищення їх міцності.

Складніше оцінити вплив целюлозних волокон, вкритих адсорбованою олією, яка обумовлює біологічну активність плодової оболонки. Складність цієї задачі полягає у відсутності даних щодо реології соняшникової олії за мінусових температур.

За даними спеціального експерименту щодо зміни агрегатного стану соняшникової олії в інтервалі температур від $+20$ °C до -196 °C було показано, що целюлозні волокна з адсорбованою олією – це практично єдина складова плодової оболонки, яка підвищує її пластичність зі зниженням температури.

Відмічено, що найсуттєво збільшується пластичність плодової оболонки в інтервалі температур -30 – -50 °C, коли олія набуває пластилиноподібної консистенції. Саме в цьому температурному інтервалі спостерігається мінімальний вихід січки та олійного пилу. Тому можна стверджувати, що можливою причиною аномального зниження виходів січки та олійного пилу є досягнення певного критичного співвідношення між міцнісними і пластичними характеристиками плодової оболонки.

Що стосується аномально високих значень виходу січки та олійного пилу за $t=-196$ °C, то це можна пояснити явищем «кріогенної крихкості» органічних високомолекулярних сполук за кріотемператур.

Що стосується структуроутворюючих білків, які містяться у плодовій оболонці в кількості біля 3,0 %, то вони як тверді речовини за умови зниження температури будуть

поступово змінювати пластично-міцнісні характеристики в бік підвищення міцності і разом з целюлозними волокнами зміцнювати плодову оболонку.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Вперше проведено дослідження закономірностей обрушування високоолійного насіння соняшнику гібриду Український F1 в умовах дії мінусових температур.

Виявлено, що раціональними умовами обрушування сухого насіння, які забезпечують граничну глибину обрушування ($K_0^{1,0}=0,99$) при мінімальних виходах січки та олійного пилу є температура охолодження в інтервалі $-30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ і швидкість обертання ротору відцентрової насіннерушки $\omega=26,7\text{ c}^{-1}$.

На підставі літературних даних та результатів досліджень проведено детальний теоретичний аналіз щодо причин зміни фізико-механічних властивостей (міцності, пластичності) плодової оболонки насіння соняшнику в умовах мінусових температур.

Одержані наукові результати досліджень вносять суттєвий вклад в теорію і практику обрушування олійного насіння, яке має морфологічні особливості будови та біохімічного складу плодової оболонки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення теоретичних уявлень процесу обрушування високоолійного насіння за умови зміни його початкової вологості.

Література

1. Пустовойт В.С. Подсолнечник / В.С. Пустовойт// Руководство по селекции и семеноводству масличных культур. – М.: Колос, 1967. – с. 7-44.
2. Кудинов П.И. Покрывные ткани семян подсолнечника и их влияние на технологию / П.И. Кудинов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1993. – №1-2. – С. 5-10.
3. www.comodity.ru/olieliding/tissue/9.html (Товароведение масличного сырья. Плодовые и семенные оболочки).
4. Лобанов В.Г. Сканирующая микроскопия семян высокомасличного подсолнечника / В.Г. Лобанов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1974. – №26. – Р. 28-29.
5. Браунс Ф.Э, Браунс Д.А. Химия лигнина. – М.: Лесная промышленность, 1964. – 864 с.
6. Дублянская Н.Ф. Биохимические свойства высокомасличных и низкомасличных семян подсолнечника / Н.Ф. Дублянская // Масложировая промышленность. – 1965 – №1. – С. 6-9.
7. Дублянская Н.Ф. Состав липидов лузги подсолнечника / Н.Ф. Дублянская // Масложировая промышленность. – 1970 – №7. – С. 4–7.
8. Александрова А.В. Влияние биохимических особенностей покровных тканей семян подсолнечника современной селекции на формирование их качества при дозревании в послеплодочный период [Электронный ресурс]: Дисс. канд. техн. наук. – Краснодар, 2005.
9. Перевалов Л.И., Попсуйшак А.В., Гладкий Ф.Ф. Пат. 114205 Україна. Спосіб обрушування соняшникового насіння, 2017.

10. Перевалов Л.И. Новая технология обрушивания семян подсолнечника / Л.И. Перевалов, Е.Н Пивень, А.В. Попсуйшапка, С.А. Тесленко // Масложировой комплекс. - №1. – 2012. – С. 47-49.
11. Тесленко С.А. Особенности обрушивания гибридов подсолнечника в замороженном виде / С.А. Тесленко, Е.П. Врюкало, Л.И. Перевалов // Вестник НТУ «ХПИ». - №14(1123). – 2015. – С. 79-92.
12. Перевалов Л.И. Вплив вологості високоолеїнового соняшнику гібриду Український F1 на обрушування цього насіння в замороженому стані / Л.И. Перевалов // Інтегровані технології та енергозбереження. - №4. – 2019. – С. 56-63.
13. Перевалов Л.И. Технологічні аспекти одержання високоякісного ядра соняшника для кондитерських цілей / Л.И. Перевалов, Л.В. Фадєєв, В.К. Тимченко, М.В. Д'яченко // Вісник НТУ «ХПИ». - №5(1359). – 2020. – С. 51-55.
14. Перевалов Л.И. Теоретичні та експериментальні дослідження процесів обрушування насіння соняшнику кондитерських сортів / Л.И. Перевалов, О.М. Пивень, Л.В. Фадєєв, М.В. Д'яченко // Інтегровані технології та енергозбереження. - №2. – 2020. – С. 57-68.
15. Іхно М.П. Пат. 17430 Україна. Насіннерушка-2 Іхно, 2000.
16. Кошевой Е.П. Технологическое оборудование предприятий производства растительных масел / Е.П. Кошевой. – СПб.: ГИОРД, 2001. – 368 с.
17. Іхно М.П. Науково-практичні основи отримання та використання харчового безлушпинного ядра соняшника. Автореф. дис. докт. техн. наук 05.18.06, 2004.

Bibliography (transliterated)

1. Pustovojt V.S. Podsolnechnik / V.S. Pustovojt // Rukovodstvo po selekcii i semenovodstvu maslichnyh kul'tur. – М.: Kolos, 1967. – р. 7-44.
2. Kudinov P.I. Pokryvnye tkani semyan podsolnechnika i ih vliyanie na tekhnologiyu / P.I. Kudinov // Izvestiya vuzov. Pishhevaya tekhnologiya. – 1993. – №1 2. – Р. 5-10.
3. www.comodity.ru/oliending/tissue/9.html (Tovarovedenie maslichnogo syr'ya. Plodovye i semennye obolochki).
4. Lobanov V.G. Skaniruyushchaya mikroskopiya semyan vysokomaslichnogo podsolnechnika / V.G. Lobanov // Izvestiya vuzov. Pishhevaya tekhnologiya. – 1974. - №26. – Р. 28-29.
5. Brauns F.E, Brauns D.A. Himiya lignina. – М.: Lesnaya promyshlennost', 1964. – 864 p.
6. Dublyanskaya N.F. Biohimicheskie svojstva vysokomaslichnyh i nizkomaslichnyh semyan podsolnechnika / N.F. Dublyanskaya // Maslozhirovaya promyshlennost'. – 1965 – №1. – Р. 6-9.
7. Dublyanskaya N.F. Sostav lipidov luzgi podsolnechnika / N.F. Dublyanskaya // Maslozhirovaya promyshlennost'. – 1970 – №7. – Р. 4–7.
8. Aleksandrova A.V. Vliyanie biohimicheskikh osobennostej pokrovnyh tkanej semyan podsolnechnika sovremennoj selekcii na formirovanie ih kachestva pri dozrevanii v posleuborochnyj period [Elektronnyj resurs]: Diss. kand. tekhn. nauk. – Krasnodar, 2005.

9. Perevalov L.I., Popsujshapka A.V., Gladkij F.F. Pat. 114205 Ukraïna. Sposib obrushuvannya sonyashnikovogo nasinnya, 2017.
10. Perevalov L.I. Novaya tekhnologiya obrushivaniya semyan podsolnechnika / L.I. Perevalov, E.N Piven', A.V. Popsujshapka, S.A. Teslenko // Maslozhirovoj kompleks. №1. – 2012. – P. 47-49.
11. Teslenko S.A. Osobennosti obrushivaniya gibridov podsolnechnika v zamorozhennyam vide / S.A. Teslenko, E.P. Vryukalo, L.I. Perevalov // Vestnik NTU «HPI». №14(1123). – 2015. – P. 79-92.
12. Perevalov L.I. Vpliv vologosti visokooleïnovogo sonyashniku gibridu Ukraïns'kij F1 na obrushuvannya c'ogo nasinnya v zamorozhenomu stani / L.I. Perevalov // Integrovani tekhnologii ta energozberezhennya. №4. – 2019. – P. 56–63.
13. Perevalov L.I. Tekhnologichni aspekti oderzhannya visokoyakisnogo yadra sonyashnika dlya konditers'kih cilej / L.I. Perevalov, L.V. Fadeev, V.K. Timchenko, M.V. D'yachenko // Visnik NTU «HPI». №5(1359). – 2020. – P. 51-55.
14. Perevalov L.I. Teoretichni ta eksperimental'ni doslidzhennya procesiv obrushuvannya nasinnya sonyashniku konditers'kih sortiv / L.I. Perevalov, O.M. Piven', L.V. Fadeev, M.V. D'yachenko // Integrovani tekhnologii ta energozberezhennya. - №2. – 2020. – P. 57-68.
15. Ihno M.P. Pat. 17430 Ukraïna. Nasinnerushka-2 Ihno, 2000.
16. Koshevoj E.P. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatij proizvodstva rastitel'nyh masel / E.P. Koshevoj. – SPb.: GIOR, 2001. – 368 p.
17. Ihno M.P. Naukovo-praktichni osnovi otrimannya ta vikoristannya harchovogo bezlushpinnogo yadra sonyashnika. Avtoref. dis. dokt. tekhn.. nauk 05.18.06, 2004.

УДК 582.998.2:664.31

Перевалов Л.І., к.техн.н., професор, Голодняк В.О., к.техн.н., консультант,
Демидов І.М., д.техн.н., професор, Тимченко В.К., к.техн.н., професор,
Півень О.М., к.техн.н., професор, Мольченко С.М., к.техн.н., доцент

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРУШУВАННЯ ВИСОКООЛІЙНОГО СОНЯШНИКУ В УМОВАХ ДІЇ ВІДЦЕНТРОВОГО ПОЛЯ

Поява у 60-ті роки минулого століття високоолійного насіння соняшнику з олійністю 52–54 % призвело до революційних змін у сировинній базі олійножирової промисловості, але спричинило труднощі під час його зберігання та переробки завдяки морфологічним особливостям будови та біохімічного складу плодової оболонки. Подолання основних технологічних недоліків високоолійного насіння соняшнику під час обрушування досягнуто завдяки запровадженню інноваційної технології обрушування насіння в охолоджуваному стані до мінусових температур, яку розроблено на кафедрі технології жирів та продуктів бродіння НТУ«ХП». В статті наведено результати експериментального дослідження обрушування високоолійного насіння соняшнику сорту

Український F1 (коефіцієнт обрушування та коефіцієнт збереження ядра) в залежності від зміни температури (0–196°C) та швидкості обертання ротору відцентрової насіннерушки. Показано, що раціональними умовами обрушування сухого насіння, які дозволяють досягнути граничну глибину обрушування ($K_0 = 0,99$) за умови мінімальних виходів січки та олійного пилу, є температура охолодження в інтервалі -30–50 °C та швидкість обертання насіннерушки 26,7 с⁻¹. На підставі літературних даних та результатів досліджень проведено детальний теоретичний аналіз щодо причин зміни фізико – механічних властивостей (міцності, пластичності) плодової оболонки насіння соняшнику в умовах дії мінусових температур та відцентрової сили.

Ключові слова: високоолійний соняшник, морфологія та хімічний склад насіння, мінусові температури, обрушування, відцентрова дія.

Перевалов Л.И., Голодняк В.А., Демидов И.Н., Тимченко В.К., Пивень Е.Н.,
Мольченко С.Н.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБРУШИВАНИЯ ВЫСОКОМАСЛИЧНОГО ПОДСОЛНЕЧНИКА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЛЯ

Появление в 60-е годы прошлого столетия высокомасличных семян подсолнечника с масличностью 52-54% привело к революционным изменениям в сырьевой базе масложировой промышленности но вызвало трудности в процессе его хранения и переработки из за морфологических особенностей строения и биохимического состава плодовой оболочки. Преодоление основных технологических недостатков высокомасличных семян подсолнечника при обрушивании достигнуто благодаря разработке инновационной технологии обрушивания семян в охлажденном состоянии до минусовых температур, которая разработана на кафедре технологии жиров и продуктов брожения НТУ«ХПИ». В статье приведены результаты экспериментального исследования обрушивания высокомасличных семян подсолнечника сорта Украинский F1 (коэффициент обрушивания и коэффициент сохранения ядра) в зависимости от изменения температуры (0–196°C) и скорости вращения ротора центробежной семенорушки. Показано что рациональными условиями обрушивания сухих семян, которые позволяют достигнуть предельной глубины обрушивания ($K_0 = 0,99$) при условии минимальных выходов сечки и масличной пыли, является температура охлаждения в интервале -30 –50°C и скорость вращения семянорушки 26,7 с⁻¹. На основании литературных данных и результатов исследования проведен подробный теоретический анализ причин изменения физикохимических свойств (прочности, пластичности) плодовой оболочки семян подсолнечника в условиях действия отрицательных температур и центробежной силы.

Ключевые слова: высокомасличный подсолнечник, морфология и химический состав семян, низкие температуры, обрушивание, центробежное действие.

Perevalov L.I., Golodnjak V.A., Demidov I.N., Timchenko V.K., Piven E.N.,
Molchenko S.N.

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES
OF LOW-TEMPERATURE DEHULLING PROCESS OF HIGH-OIL SUNFLOWER
UNDER A CENTRIFUGAL FIELD**

Appearance of high-oily sunflower seeds with oil content 52–54 % in the 60's of the last century, led to revolutionary changes in raw material base of the fat-and-oil industry, but caused difficulties in the process of its storage and processing due to the morphological structure features and biochemical composition of fruit coat. Overcoming of the main technological disadvantages for high-oily sunflower seeds during dehulling was achieved due to development of an innovative dehulling technology for seeds in frozen state to sub-zero temperatures, which was developed at the technology of fats and fermentation products department of NTU "KhPI". This paper presents results of experimental study of sunflower variety Ukrainian F1 high-oily seeds dehulling (dehulling coefficient and kernel content coefficient) depending on the temperature change (0–196°C) and centrifugal dehuller's rotor rotation speed. It has been shown that rational dehulling conditions for dry seeds, which allow to reach maximum dehulling depth ($K_0 = 0,99$) under conditions of minimum outputs of chaff and oilseed dust, are cooling temperature in the range of -30–50°C and dehuller's rotation speed 26,7 s⁻¹. Based on the literature data and research results, it has been shown that one of the main reasons of dry seeds dehulling coefficient increasing, during the transition from plus to minus temperatures, is a change in basic physicochemical properties of cellulose fibers (the basis of fruit coats biochemical composition) with a solid adsorption surface towards increasing of its strength. According to a special experiment data in relation to change in aggregate state of sunflower oil in temperature range from +20°C to -196°C, it was shown that cellulose fibers with adsorbed oil are practically the only component of fruit coat, which increases its plasticity with decreasing temperature. It is noted that fruit coat plasticity increases most significantly in temperature range -30 – -50°C, when oil obtain a plasticine-like consistency. This is exactly what temperature range where minimum yield of chaff and oilseed dust is observed, i.e. the highest dehulling quality is achieved. Obtained scientific results of this study make a significant contribution to the theory and practice of oil seeds dehulling, which have structural and compositional features of the fruit coat.

Keywords: high-oil sunflower, morphology and chemical composition of seeds, low temperatures, dehulling, centrifugal action.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною мовою**, за наступними науковими напрямками:

- ✓ *енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;*
 - ✓ *тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);*
 - ✓ *застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;*
 - ✓ *тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та криогенне устаткування медичного призначення;*
 - ✓ *електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;*
 - ✓ *економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та технологічний менеджмент;*
- а також інших напрямкам на межі різних галузей знань.

Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.

Електронна версія статті повинна бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття повинна бути роздрукована у 2-х примірниках. До матеріалів повинні додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі та рецензія доктора наук за профілем статті.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Розмір паперу А4 (210x297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:

- безпосередньо під верхньою межею зліва **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються прізвища та ініціали авторів із зазначенням наукових ступенів та посади;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується назва статті;
- нижче, пропустив одну строку, друкується назва організації, де працюють автори статті;
- після розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння повинні бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь повинні бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки повинні бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, приводиться список літератури, оформлений у відповідності до вимог ДСТУ. Згідно вимогам МОН України кількість літературних джерел повинна бути не менш за 12.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті на трьох мовах (українська, російська та англійська) повинні бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ
 Україна, 61002,
 Харків-2, вул. Кирпичова, 2,
 НТУ «ХПІ», редколегія журналу
 «Інтегровані технології та енергозбереження»,
 технічний редактор: к.техн.н.,
 професор Горбунов К.О.
 Тел. (057) 707-69-58.
 Email: gor.kona2016@gmail.com

**СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ,
 РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ**

**НА ЖУРНАЛ ВІДКРИТО ПЕРЕДПЛАТА
 В ПОШТОВИХ ВІДДІЛЕННЯХ УКРАЇНИ**

Індекс видання: 22786
 Індекс видання: 46738 – тільки для Донецька та Луганська

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1'2021

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 02.04.2020 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–60.
Зам. № 170. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.