

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

4'2019

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.

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Додаток 8 до наказу Міністерства освіти та науки України №1328 від 21.12.2015)

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>

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. Арсенєва, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ".
В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ІТІА НТУ "ХПІ"
В. П. Шаповров, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ХТІЕ НТУ "ХПІ"
П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ТЖІБ 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. Данілов, 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.Кожедауба
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, Угорщина
Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет технологій
Девид Дж. Куккулька, 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, Мехіко
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

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyansky, 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. Shapovrov, 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 Klemes, PhD., professor, DSc (Hon) of the University of Pannonia (Veszprem, Hungary) and the University of Manchester (Great Britain)
Eugeny Kenig, prof., dr.-ing., University of Paderborn, Germany
Martín Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico
Petar Sabevarbanov, 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

<i>Арсеньєв П. Ю., Товажнянський Л. Л., Арсенєва О. П.</i> Критерії для порівняння модифікованих каналів в теплообмінних апаратах при використанні пасивних методів інтенсифікації теплопередачі.....	3
<i>Мионов А. М., Ільченко М. В.</i> Інтеграція теплообмінної системи блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу.....	14

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Мацегора О. І., Арсенєва О. П., Товажнянський Л. Л., Капустенко П. О.</i> Моделі утворення забруднень на поверхнях нагріву та їх застосування для пластинчатих теплообмінників.....	22
<i>Пересьолков О. Р., Круглякова О. В.</i> Методичні аспекти теоретичного дослідження роботи системи оборотного водопостачання з вентиляторною градирнею в умовах підвищеної температури зовнішнього повітря.....	33

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Григоров А. Б.</i> Технологічна переробка нафтового шламу в пластичні мастила.....	43
<i>Саввова О. В., Шимон В. М., Бабіч О. В., Шерегій А. А., Шимон М. В.</i> Дослідження впливу структури поверхні біоактивних склокристалічних матеріалів на їх здатність до зв'язування з альбуміном.....	48
<i>Перевалов Л. І., Півень О. М., Тесленко С. О.</i> Вплив вологості насіння високоолеїнового соняшнику гібрида УКРАЇНСЬКИЙ F1 на обрушування цього насіння в замороженому стані.....	56
<i>Мардупенко О. О., Григоров А. Б., Сінкевич І. В.</i> Технологія отримання бітумів з поліпшеними експлуатаційними властивостями.....	64
<i>Арсеньєва О. П., Фрідлер Ф., Орош А., Капустенко П. О.</i> Синтез технологічної мережі для мінімізації енергії та витрат з використанням концепції Р-графів.....	69

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Кусаков С. К.</i> Джерела тепла низького потенціалу і вимоги до теплообмінного обладнання для енергетично ефективної утилізації такого тепла.....	79
<i>Сторінка редколегії.....</i>	91

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 10 від 29.11.2019 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4. – 92 с.

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

© Національний технічний університет «ХПІ», 2019

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

4'2019

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

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

Підп. до друку 12.12.2019 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. № 140. Ціна договірна.

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

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

Арсеньєв П.Ю., аспірант, ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., д.техн.н., професор,
Арсеньєва О.П., д.техн.н., професор

КРИТЕРІЇ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ МОДИФІКОВАНИХ КАНАЛІВ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПАСИВНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ

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

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, критерії оцінки, інтенсифікація теплопередачі.

Вступ. На сьогодні існує багато різних пасивних методів інтенсифікації теплообміну, і більшість авторів демонструють переваги запропонованої ними поверхні теплопередачі за певними критеріями. Найкраща геометрія поверхні та її ефективність вирішальним чином залежать від заданих технологічних умов та особливостей конструкції теплообмінника, що розглядається. При сучасній розробці комп'ютерних технологій та чисельних методів проблема може бути сформульована як пошук оптимальної геометрії поверхні теплообміну з оптимальною конструкцією теплообмінника для заданих технологічних умов. Проте об'єктивне порівняння продуктивності та ефективності різних покращених поверхонь для компактних теплообмінників все ще залишається важливою проблемою. Всі запропоновані методи встановлення критеріїв оцінки ефективності поверхонь з удосконаленою теплопередачею потребують порівняння з початковим теплообмінником, у якості якого найчастіше використовують теплообмінник з гладкою поверхнею. Починаючи з першої половини двадцятого століття, основна ідея полягала в порівнянні одного з трьох критеріїв оцінки, отриманих як співвідношення для нового та початкового теплообмінника: площі поверхні теплопередачі r_F , потужності насоса на прокачку носія тепла r_p і потужності нагріву r_Q , коли два інших співвідношення рівні. Цей підхід був додатково розроблений та описаний в роботі [1], де на основі аналізу попередніх досліджень були запропоновані критерії оцінки для поверхонь з інтенсифікацією теплопередачі в однофазних потоках. Залежно від мети та умов застосування теплообмінника, в роботі визначені конструктивні обмеження та розроблено систему критеріїв, по яких можна оцінити удосконалення поверхні теплообміну для рядка умов застосувань. Даний підхід було поглиблено в роботі [2]. Точна оцінка ефективності поверхні теплообміну вимагає точних співвідношень для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та коефіцієнта тертя α поверхню. Але, згідно [1], в режимі турбулентного потоку у трубах можна використати приблизні оцінки, отримані з деякими припущеннями.

Критерії порівняння трубчастих поверхонь теплообміну. При порівнянні двох різних трубчастих поверхонь теплообміну звичайно вводять кілька простих критеріїв ефективності підвищення теплопередачі. Порівняння проводиться між двома теплообмінниками, та розглядаються поверхні теплообміну всередині труб. Як правило, трубку з інтенсифікованою тепловіддачею позначають без індексу, та її діаметр – D .

Трубка, з якою вона порівнюється, позначається індексом 1, та її діаметр становить D_s . Даний підхід має наступні припущення:

1. Трубки повинні мати рівні діаметри, $D = D_s$;
2. В обох теплообмінниках в каналах проходить теплообмін між однаковими теплоносіями, які рухаються з однаковою швидкістю потоку V , $\text{м}^3/\text{с}$ і мають однакові фізичні властивості;
3. Температурні програми для двох теплообмінних апаратів однакові;
4. Коефіцієнт теплопередачі визначається згідно коефіцієнтам тепловіддачі чистих поверхонь без забруднень, так як термічні опори на чистій стінці значно менші, ніж термічний опір теплопередачі скрізь досліджувану стінку.

Розглянемо середовища, що протікають через n трубок теплообмінника з розходом потоку V , $\text{м}^3/\text{с}$. Потужність прокачування можна виразити:

$$P_p = V \cdot \Delta P = w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot n \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot 2 \cdot w^2, \quad (1)$$

де w – швидкість течії, $\text{м}/\text{с}$.

Для однакових властивостей рідини відношення потужності накачування в теплообміннику з інтенсифікованою поверхнею та порівняно зі стандартною трубою:

$$r_p = \frac{D \cdot n \cdot f(\text{Re}) \cdot L \cdot w^3}{D_1 \cdot n_1 \cdot f_1(\text{Re}_1) \cdot L_1 \cdot w_1^3} = \frac{(n \cdot L) \cdot f(\text{Re}) \cdot \text{Re}^3}{(n_1 \cdot L_1) \cdot f_1(\text{Re}_1) \cdot \text{Re}_1^3}. \quad (2)$$

Співвідношення площ теплопередачі:

$$r_F = \frac{(n \cdot L)}{(n_1 \cdot L_1)}. \quad (3)$$

Відношення коефіцієнтів теплової потужності:

$$r_Q = \frac{(n \cdot L) \cdot \text{Nu}}{(n_1 \cdot L_1) \cdot \text{Nu}_1}. \quad (4)$$

Для порівняння при одних і тих же потужності на прокачування та площі поверхні теплопередачі передбачається, що $r_F = 1$ і $r_p = 1$. При порівнянні з гладкою трубою слід дотримуватися наступного співвідношення:

$$f(\text{Re}) \cdot \text{Re}^3 = f_s(\text{Re}_s) \cdot \text{Re}_s^3. \quad (5)$$

Якщо співвідношення для теплопередачі та гідравлічного опору відомі, потужність нагріву на обох поверхнях можна порівняти за співвідношенням коефіцієнтів тепловіддачі при рівній потужності прокачування:

$$\eta_Q = \left(\frac{h}{h_s} \right)_{pp} = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_s(Re_s)} \right)_{pp} = \eta \quad (6)$$

Ряд дослідників використовували відношення η як критерій для порівняння інтенсифікованих трубок. Наприклад, в роботі [3] цей коефіцієнт значиться як "ефективність роботи", у роботі [4] він зазначений як "індекс теплового посилення", а в статті [5] – "коефіцієнтом теплового посилення". Незважаючи на розбіжності у назві співвідношення (6), цей критерій має чітке фізичне значення: критерій ефективності η_Q визначає відношення потужності нагріву при рівній силі прокачування та площі теплопередачі для інтенсифікованих та гладких трубчастих поверхонь. Тим часом застосування цього критерію є дещо складним, тому що вимагає обчислення порівняних чисел Нуссельта при різних числах Рейнольдса, визначених виразом (5).

Для більш поширеного використання критерію (6), в роботі [1] були запропоновані деякі припущення щодо розрахунків чисел Рейнольдса, Нуссельта та коефіцієнта тертя. При розрахунку чисел Рейнольдса в співвідношенні (5) запропоновано використовувати однакоє значення показника ступеню для труби з інтенсифікованою поверхнею та для гладкої. Якщо показник ступеню числа Рейнольдса при розрахунку числа Нуссельта для гладкої труби дорівнює n , а для коефіцієнта тертя m , то коефіцієнт тертя в трубці з інтенсифікованою поверхнею (при однакових властивостях теплоносіїв):

$$f(Re) = B \cdot Re^m. \quad (7)$$

У трубці, з якою проводиться порівняння:

$$f_1(Re) = B_1 \cdot Re^m. \quad (8)$$

Відношення коефіцієнтів у цих рівняннях дорівнює відношенню коефіцієнтів тертя, обчислених для одних і тих же чисел Рейнольдса, тоді:

$$\frac{B}{B_1} = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right). \quad (9)$$

Звідки:

$$\frac{f(Re)}{f_1(Re_1)} = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^m. \quad (10)$$

Та співвідношення (5) приймає наступний вид:

$$\left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^m = \left(\frac{Re_1}{Re} \right)^3. \quad (11)$$

Відношення чисел Рейнольдса при порівнянні труб з однаковою потужністю накачування:

$$\frac{Re_1}{Re} = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right)^{\frac{1}{3+m}} \quad (12)$$

При розрахунках відношення чисел Нуссельта використовується цей же підхід:

$$\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re_1)} = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^n \quad (13)$$

Вираз (12) можна використовувати також в співвідношенні (14). Тоді вираз для відношення теплової потужності (4) при $nL=n_1L_1$ приймає вид:

$$\eta_Q = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) / \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right)^{\frac{n}{3+m}} \quad (14)$$

Для оцінки співвідношення потужності накачування $\eta_p=r_p$, коли потужність нагріву та площа поверхні теплообміну однакова, слід дотримуватися $r_F=1$ і $r_Q=1$.

З рівнянь (4) та (13) при $nL=n_1L_1$ отримуємо:

$$\left(\frac{Re}{Re_1} \right) = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

Після підстановки рівнянь (10) та (15) до рівняння (2):

$$\eta_p = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^{3+m} = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) / \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right)^{\frac{3+m}{n}} \quad (16)$$

При порівнянні з виразом (14), маємо відношення η_p до η_Q :

$$\eta_p = \eta_Q^{-\left(\frac{n}{3+m}\right)} \quad (17)$$

Для оцінки співвідношення площ передачі тепла $\eta_F=r_F$, коли потужність нагріву та потужність прокачування рівні, слід дотримуватися $r_p=1$ і $r_Q=1$. У цьому випадку з рівнянь (2), (4), (11) та (13):

$$\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^n = \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) \cdot \left(\frac{Re}{Re_1} \right)^{m+3} \quad (18)$$

та

$$\frac{Re}{Re_1} = \left[\left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) / \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) \right]^{\frac{1}{n-(m+3)}} \quad (19)$$

З рівняння (4) при $r_Q=1$ та враховуючи рівняння (13), маємо:

$$\frac{n \cdot L}{n_1 \cdot L_1} = \left\{ \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) \cdot \left[\left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right) / \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) \right]^{\frac{n}{n-(m+3)}} \right\}^{-1} \quad (20)$$

З рівняння (3) при $\eta_F=r_F$ отримуємо:

$$\eta_F = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right)^{\frac{n}{n-(m+3)-1}} / \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right)^{\frac{n}{n-(m+3)}} = \left[\left(\frac{Nu(Re)}{Nu_1(Re)} \right) / \left(\frac{f(Re)}{f_1(Re)} \right)^{\frac{n}{m+3}} \right]^{\frac{n}{n-(m+3)-1}} \quad (21)$$

Та вираз (17) приймає наступний вигляд:

$$\eta_F = \eta_Q^{\left(\frac{1}{\frac{n}{m+3}-1} \right)} \quad (22)$$

При порівнянні гладкої трубки з розвиненим турбулентним потоком можна вважати $n = 0,8$ у співвідношенні для числа Нуссельта і $m = -0,25$ у співвідношенні для коефіцієнта тертя. Критерій співвідношення потужностей нагріву обчислюється згідно співвідношення:

$$\eta_Q = \left(\frac{Nu(Re)}{Nu_s(Re)} \right) / \left(\frac{f(Re)}{f_s(Re)} \right)^{0.291} \quad (23)$$

Інші два критерії можна виразити через η_Q рівняннями (17) та (22) наступним чином:

$$\eta_P = \eta_Q^{-0.291}; \quad (24)$$

$$\eta_F = \eta_Q^{-1.41} \quad (25)$$

Важливо зазначити, що критерії η_P та η_F можна виразити через критерій η_Q простими рівняннями (17) та (22). Значення критерію η_Q характеризує відносну продуктивність інтенсифікованої трубки за всіма цими критеріями і цей критерій можна вва-

жати загальним коефіцієнтом покращення, як це зазначено в роботі [6], де для ступеню взятий показник 1/3:

$$\eta = \left(\frac{\text{Nu}(\text{Re})}{\text{Nu}_s(\text{Re})} \right) / \left(\frac{f(\text{Re})}{f_s(\text{Re})} \right)^{1/3} \quad (26)$$

Подібні співвідношення були запропоновані в [7], де $m = -0,2$ і показник у рівнянні (23) дорівнює 0,286. Розрахунок приблизного характеру запропонованих рівнянь для η та η_0 та отримана різниця в експонентах 0,291, 0,286 та 1/3 не є істотною, але для правильного порівняння різних інтенсифікованих поверхонь повинен використовуватися лише один із цих показників. Рівняння (26) було використано нещодавно деякими дослідниками для порівнянь продуктивності різних посиленних трубок, наприклад, як це зроблено в роботі [8].

Порівняння пластинчатих теплообмінних апаратів з каналами різної геометричної форми. При порівнянні двох пластинчатих теплообмінників з різною геометричною формою каналів, необхідно знати вирази для обчислення коефіцієнту тертя та чисел Нуссельта, які використовуються у рівняннях (23–25). Як і для трубчастих поверхонь, їх вид залежить від геометричної форми каналу. В роботі [9] наведені узагальнені рівняння для розрахунку коефіцієнту тертя для різноманітних форм гофрування. Рівняння для розрахунку чисел Нуссельта в умовах газових та водних потоків запропоновані в роботі [10], а для інших середовищ в роботі [11]. На цих рівняннях базується методика оптимального розрахунку розбірних пластинчатих теплообмінників [12]. Вони були застосовані в цій статті при порівнянні критеріїв для площі поверхні теплопередачі, насосної потужності і потужності нагріву.

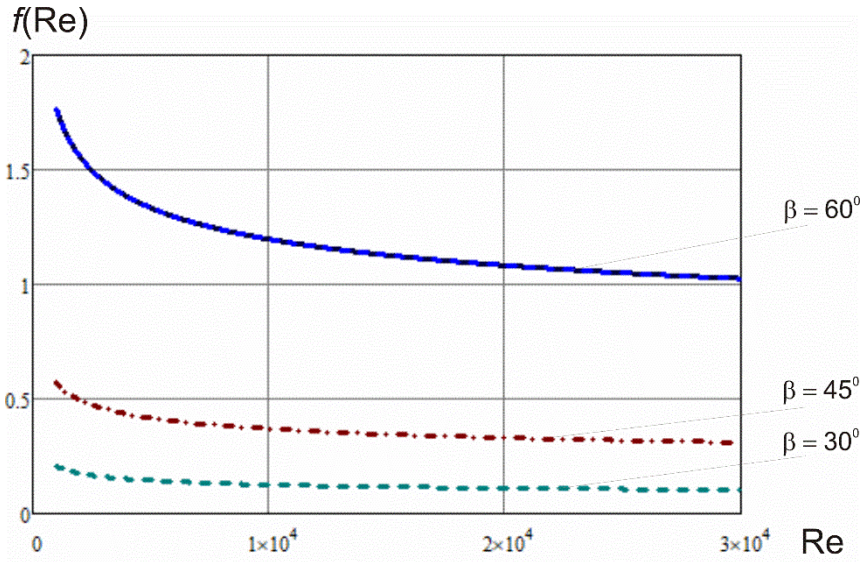
Для порівняння пластинчатих теплообмінних поверхонь були взяті дані для чотирьох експериментальних зразків гофрованих пластин, представлених в роботі [13] та наданих в таблиці 1. В розглянутих експериментах вода використовувалась як теплоносій. Результати розрахунку коефіцієнтів тертя та чисел Нуссельта для кожного виду гофрування наведені на рис. 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри експериментальних пластин роботи [10]

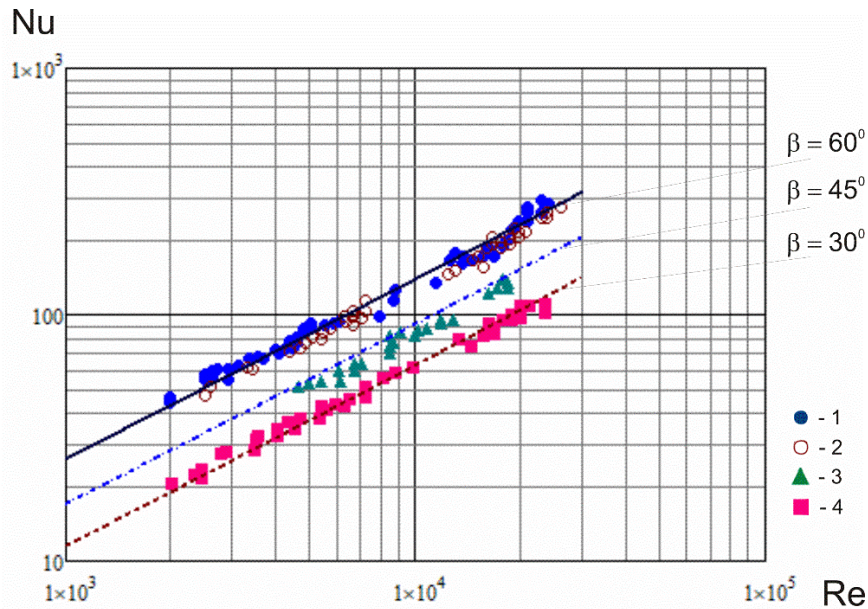
Зразок N_o	Шаг гофрування S , мм	Висота гофрування b , мм	Кут нахилу β , град	Длина пластини L , м	Ширина пластини W , мм	Гідравлічний діаметр каналу d_h , мм	F_x
1	18	5	60	1.0	225	9.6	1.15
2	36	10	60	1.0	225	19.3	1.15
3	18	5	45	1.0	225	9.3	1.15
4	18	5	30	1.0	225	9.0	1.15

При порівнянні зразок 4 (з кутом нахилу гофри 30°), таблиця 1, був взятий як початковий. Його параметри були порівняні зі зразком 1 (коефіцієнт η_{01}) та зразком 3

(коефіцієнт η_{Q2}). Був обчислений критерій продуктивності згідно рівняння (23) для чисел Рейнольдса від 1000 до 30000. При цьому коефіцієнт η_{Q1} змінювався у діапазоні від 1.137 до 1.2033 а η_{Q2} від 1.0641 до 1.0996. Це дає змогу визначити, що застосування пластин з гізним кутом нахилу у одному апараті веде до підвищення ефективності теплопередаючої поверхні з зростанням кута нахилу гофри найбільш на 20 відсотків.



а)



б)

Рисунок 1 – Коефіцієнт тертя (а) та тепловіддача (б) у різних каналах ПТА [10].
1, 2, 3, 4 – експериментальні зразки, таблиця 1

У той самий час, як показано в роботі [12], площа поверхні пластинчатих теплообмінників у два та більше разів менша поверхні кожухотрубчастих теплообмінників для тих самих умов процесу теплопередачі. Таким чином, зміна кута нахилу гофри дає

можливість оптимізації теплових та гідравлічних показників пластинчастих теплообмінників згідно заданих умов процесу без істотного зменшення ефективності поверхні теплопередачі. Ці особливості дають переваги використанню пластинчастих теплообмінників при оптимізації капітальних витрат на теплообмінне обладнання в складних проектах розробки енергоефективних виробничих підприємств [14] та мінімізації площі поверхні для рекуперації [15]. При цьому треба враховувати показане в роботі [16] суттєве зменшення термічного опору забруднень в пластинчастих теплообмінниках, що може суттєво позначитись на результатах оптимізації та на виборі конструкції апарату для конкретних умов процесу, як показано в роботі [17].

Висновки. У статті представлено підхід до застосування критеріїв ефективності для порівняння різних типів теплообмінних апаратів. Це дозволяє оцінити оптимальні параметри конструкції теплообмінника для заданих умов експлуатації. Представлені рівняння (23–25) отримані для розвинутого турбулентного потоку з припущенням, що показники ступеню при числах Рейнольдса в виразах для інтенсифікованих трубок та каналів близькі за значенням до рівня в гладких трубах. Зазначені рівняння можна розглядати лише як деяке наближення, що дозволяє не тільки порівняти продуктивність різних інтенсифікованих поверхонь, але й оцінити вплив деяких параметрів на продуктивність теплопередачі. Важливим висновком є те, що для підвищення продуктивності поверхні теплообміну набагато важливіше збільшити значення числа Нуссельта, навіть за рахунок значного зростання коефіцієнта тертя. Розрахунок критерію продуктивності апаратів отриманий для декількох типів пластинчастих теплообмінників з різною гофрованою поверхнею, та визначено як отримати найпродуктивніше гофрування.

Література

1. Webb R.L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Т. 24, № 4. – С. 715–726.
2. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. Машиностроение, Москва, 1973. 240 с.
3. Bilen K., Akyol U., Yapici S. Heat transfer and friction correlations and thermal performance analysis for a finned surface // *Energy Conversion and Management*. – 2001. – Т. 42, № 9. – С. 1071–1083.
4. Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 53–62.
5. Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Eiamsa-ard P., Thianpong C. Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – Т. 30, № 4. – С. 310–318.
6. Liu S., Sakr M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Т. 19. – С. 64–81.
7. Интенсификация теплообмена в каналах. / Калинин Э К. – 3-е изд., перераб. и доп изд. – Москва: Машиностроение, 1990.
8. Hasanpour A., Farhadi M., Sedighi K. A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Т. 55. – С. 53–62.

9. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalised correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
10. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
11. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., & Demirskiy O.V., 2014, Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
12. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009, Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*. 18, 791–796.
13. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Цыбульник В.А., 1980, Теплообмен и гидравлическое сопротивление щелевидных каналов сетчато-поточного типа пластинчатых теплообменников *Изв. вузов «Энергетика»*—М. 9,123–125.
14. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš JJ., 2012, Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1447–52.
15. Boldyryev S, Varbanov P.S, Nemet A, Klemeš J.J, Kapustenko P., 2014, Minimum heat transfer area for Total Site heat recovery. *Energy conversion and management*. 87,1093–1097.
16. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chemical Engineering Transactions*, 12 (2007) 207–212.
17. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.

Bibliography (transliterated)

1. Webb R.L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Т. 24, # 4. – С. 715–726.
2. Baranovskij N.V., Kovalenko L.M., Yastrebeneczkij A.R. *Plastinchaty`e i spiral`ny`e teploobmenniki*. Mashinostroenie, Moskva, 1973. 240 p.
3. Bilen K., Akyol U., Yapici S. Heat transfer and friction correlations and thermal performance analysis for a finned surface // *Energy Conversion and Management*. – 2001. – Т. 42, # 9. – С. 1071–1083.
4. Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P. Turbulent heat transfer enhancement by counter/co-swirling flow in a tube fitted with twin twisted tapes // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – vol. 34, № 1. – P. 53–62.
5. Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Eiamsa-ard P., Thianpong C. Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – vol. 30, № 4. – P. 310–318.
6. Liu S., Sakr M. A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – vol. 19. – P. 64–81.
7. Intensifikaciya teploobmena v kanalakh. / Kalinin E` K. – 3-e izd., pererab. i dop izd. – Moskva: Mashinostroenie, 1990.

8. Hasanpour A., Farhadi M., Sedighi K. A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – vol. 55. – P. 53–62.
9. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, Chemical Engineering Transactions, 25, 399–404.
10. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, Chemical Engineering Transactions, 25: 357–362.
11. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., & Demirskiy O.V., 2014, Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. Applied Thermal Engineering, 70(2), 1208–1215.
12. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009, Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, Chemical Engineering Transactions. 18, 791–796.
13. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Czybul'nik V.A., 1980, Teploobmen i gidravlicheskie soprotivleniye shhelevidnykh kanalov setchato-potochnogo tipa plastinchatykh teploobmennikov Izv. vuzov «Energetika»–M. 9,123–125.
14. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš JJ., 2012, Capital cost targeting of total site heat recovery. Chemical Engineering Transactions, 29, 1447–52.
15. Boldyryev S, Varbanov P.S, Nemet A, Klemeš J.J, Kapustenko P., 2014, Minimum heat transfer area for Total Site heat recovery. Energy conversion and management. 87,1093–1097.
16. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Accounting for fouling in plate heat exchanger design, Chemical Engineering Transactions, 12 (2007) 207–212.
17. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. Applied Thermal Engineering, 105, 763–773.

УДК 66.045.01.

Арсеньєв П.Ю., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., Арсен'єва О.П.

**КРИТЕРІЇ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ МОДИФІКОВАНИХ КАНАЛІВ
В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПАСИВНИХ
МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ**

На сьогодні існує тенденція використання компактних теплообмінних апаратів з удосконаленою поверхнею каналів, що дозволяє збільшити загальний коефіцієнт теплопередачі в апараті, але негативно впливає на гідравлічні характеристики руху рідини. Проблема вибору оптимальної конструкції становить пошук оптимальної геометрії поверхні теплообміну з оптимальною конструкцією теплообмінника для заданих технологічних умов, а не лише отримання найкращої геометрії поверхні загалом. При цьо-

му необхідно визначити критерії для об'єктивного порівняння продуктивності та ефективності різних покращених поверхонь компактних теплообмінників. У даній роботі розглянуті основні підходи щодо порівняння різних типів теплообмінних апаратів з інтенсифікацією теплопередачі та запропонований узагальнений підхід, який може використовуватися для попереднього вибору сучасного теплообмінного устаткування на промислових підприємствах.

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, критерії оцінки, інтенсифікація теплопередачі.

Арсеньев П.Ю., Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П.

КРИТЕРИИ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КАНАЛОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАССИВНЫХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

В настоящее время существует тенденция использования компактных теплообменных аппаратов с усовершенствованной поверхностью каналов, что позволяет увеличить общий коэффициент теплопередачи в аппарате, но может негативно влиять на его гидравлические характеристики. Проблема выбора оптимальной конструкции является проблемой поиска оптимальной геометрии поверхности теплообмена с оптимальной конструкцией теплообменника для заданных технологических условий, а не только получение лучшей геометрии поверхности в целом. При этом необходимо определить критерии для объективного сравнения производительности и эффективности различных улучшенных поверхностей компактных теплообменников. В данной работе рассмотрены основные подходы к сравнению различных типов теплообменных аппаратов с интенсификацией теплопередачи и предложен обобщенный подход, который может использоваться для предварительного выбора современного теплообменного оборудования на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменный аппарат, теплопередача, критерии оценки, интенсификация теплопередачи.

Arsenyev P., Tovazhnyansky L., Arsenyeva O.

CRITERIA FOR COMPARING MODIFIED CHANNELS IN HEAT EXCHANGERS USING PASSIVE METHODS OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION

Today, there is a tendency to use compact heat exchangers with an improved channel surface, which increases the overall heat transfer coefficient of the apparatus, but has a negative effect on the hydraulic characteristics of the fluid. The problem with choosing the optimal design is to find the optimal geometry of the surface of the heat exchanger with the optimal design of the heat exchanger for the given technological conditions, and not only to obtain the best geometry of the surface as a whole. At the same time, it is necessary to define criteria for objective comparison of the performance and efficiency of various improved surfaces of compact heat exchangers. This paper discusses the basic approaches to comparing different types of heat exchangers with heat transfer intensification and proposes a generalized approach that can be used to pre-select modern heat exchangers at industrial plants.

Keywords: plate heat exchanger, heat transfer, comparison criteria, heat transfer intensification.

Миронов А.М., к.техн.н., Ільченко М.В., к.техн.н.

**ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІННОЇ СИСТЕМИ БЛОКУ СТАБІЛІЗАЦІЇ
ГІДРОГЕНІЗАТУ НА УСТАНОВЦІ ЛЕГКОГО ГІДРОКРЕКІНГУ***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

Ключові слова: інтеграція процесів, пінч-аналіз, пінч-технології, рекуперація, складові криві, сіткова діаграма, гідрогенізація, гідрокрекінг.

Питання підвищення енергоефективності виробництв в Україні щороку стає дедалі більш актуальним. Ці тенденції одночасно викликають інтерес й у держави, й у власників підприємств, які втрачають прибутки через надмірні витрати на енергоносії. Хімічні та переробні галузі відчувають найбільший тиск з боку високих тарифів через великі обсяги закупівлі палив на теплоносії. До того ж сама робота підприємств призводить до вкрай несприятливого впливу на навколишнє природне середовище через значні об'єми прямих викидів забруднюючих речовин, парникових газів, відходів виробництва та просто теплової емісії. Забезпечити дійсно раціональне використання ресурсів та скоротити шкідливу дію хімічних виробництв можна лише на основі всебічного аналізу та оптимізації хіміко-технологічних систем (ХТС), які покладені до їхньої основи [1, 2].

Серед відомих способів промислової економії ресурсів слід назвати інтеграцію процесів – насамперед, як інструмент модернізації теплообмінних систем виробництв. Її методи дозволяють суттєво зменшити долю зовнішніх енергоносіїв у підсистемах та збільшити рекуперацію без жодного впливу на виробничу технологію. Зокрема, йдеться про проектування енергоефективних мереж теплообміну з використанням методу пінч-аналізу. Стосовно до ректифікаційних установок проблема раціонального використання тепла є надзвичайно важливою, оскільки наразі енергія здебільшого використовується не у оптимальному режимі. Питання про правильний вибір теплової схеми установки зазвичай вирішується на основі теплового балансу, оскільки це має істотне економічне значення, особливо для установок безперервної дії на багатотоннажних виробництвах. Тому саме оптимізація використання енергії та підвищення її рекуперації за рахунок внутрішніх ресурсів системи є головною задачею сучасного проектування подібних установок [3, 4].

Досвідчені проектувальники з країн Західної Європи дійшли висновку, що аби уникнути недоліків та труднощів, а також досягти бажаного результату при синтезі оптимальної структури ХТС необхідно використовувати методи, які мають наступні специфічні властивості: можливість знаходження альтернативних структур у районі оптимуму, мінімальний обсяг необхідної для роботи початкової інформації, можливість врахування якісно різних вимог до глобальних параметрів виробництва, оперування простими структурами, можливість діалогу між проектувальником та обчислювальною машиною, можливість легкого додавання особистого досвіду проектувальника до наявного алгоритму, перспектива застосування для вирішення великих промислових завдань та масштабування проектів [5]. Усе це досить чітко втілює метод пінч-аналізу, який був обраний у якості базового для даної роботи. Надзвичайно важливим є те, що він вже на початкових стадіях дослідження дозволяє оцінити доступний потенціал ене-

розбереження процесу та перебачити заходи для досягнення найефективніших енергетичних цілей [6, 7].

Метою представленої роботи є аналіз енергоспоживання та теплоенергетична інтеграція теплообмінної системи блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу задля збільшення рекуперації тепла у системі та скорочення потужностей зовнішніх утиліт.

Для початку роботи необхідно здійснити детальний аналіз процесу та скласти таблицю потоків, які можуть приймати участь у тепловій інтеграції [8, 9]. Спрощена функціональна енерготехнологічна схема виробництва представлена на рис. 1.

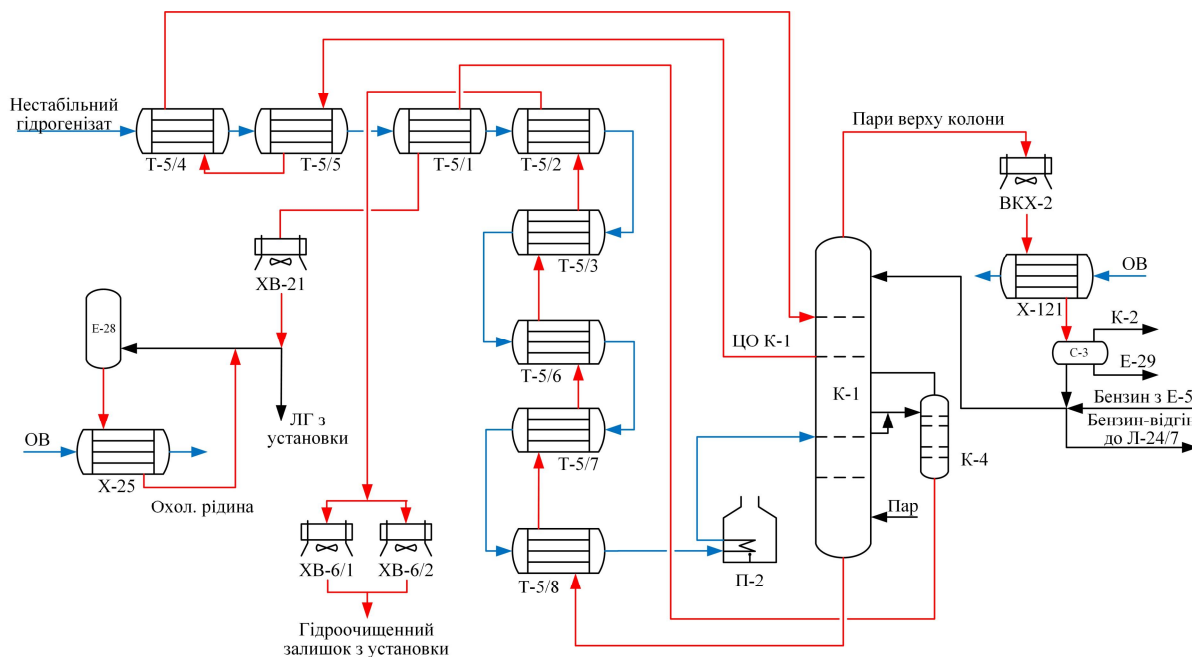


Рисунок 1 – Функціональна енерготехнологічна схема блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу

Технологічний процес відбувається наступним чином. Нестабільний гідрогенізат з сепаратора низького тиску С-102 послідовно прокачується через теплообмінники Т-5/4, Т-5/5, Т-5/1, Т-5/2, Т-5/3, Т-5/6, Т-5/7, Т-5/8 та піч П-2. З печі П-2 нестабільний гідрогенізат надходить до зони живлення стабілізаційної колони К-1 (тарілка № 22). У колоні К-1 відбувається відпарювання розчинених газів, сірководню з нестабільного гідрогенізату та його поділ на легкий газойль (ЛГК), бензин-відгін та гідроочищений залишок.

Для відпарювання легких фракцій та зниження температури куба колони передбачена подача перегрітої водяної пари. З верху колони К-1 пари бензину, води і вуглеводневий газ надходить шлемовою лінією у повітряний холодильник-конденсатор ВХК-2, де вони конденсуються та охолоджуються. З повітряного холодильника-конденсатора ВХК-2 продукт надходить до водяного холодильника Х-21, де охолоджується та далі спрямовується до сепаратору бензину С-3. У сепараторі бензину С-3 відбувається поділ вуглеводневого газу, бензину та води.

Частина бензин-відгону у якості зрошення подається в колону К-1, балансна кількість бензин-відгону виводиться на установку Л-24/7 або ЕЛОУ-АВТ-6. Бензин-відгін виводиться з установки. Температурний режим верху колони К-1 забезпечується подачею гострого зрошення, у якості якого використовується частина бензинової фрак-

ції. Надмірне тепло колони К-1 знімається потоком циркуляційного зрошення (ЦО). Циркуляційне зрошення (ЦО) відбирається з колони К-1 з тарілки № 12 та прокачується крізь міжтрубний простір теплообмінників Т-5/5 та Т5/4, де віддає тепло на нагрівання нестабільного гідрогенізату та повертається до колони К-1 (на тарілку № 10).

Боковим погоном з колони К-1 (з тарілок № 14, 15), по перетічній лінії, самопливом, у стріппінг К-4 надходить легкий газойль. Під тарілку № 6, стріппінгу К-4, подається перегріта водяна пара. Пари легкокиплячих фракцій та водяна пара зі стріппінгу К-4 виводяться по лінії повернення парів у К-1, на тарілку № 12. Відпарена фракція легкого газойлю зі стріппінгу К-4 прокачується по міжтрубному простору теплообмінника стабілізації Т-5/1, нагріває нестабільний гідрогенізат, охолоджується у повітряному холодильнику ХВ-21 і виводиться з установки.

З куба колони К-1 поступає гідроочищений залишок, прокачується крізь міжтрубний простір теплообмінників Т-5/8,7,6,3,2, охолоджується у повітряних холодильниках ХВ-6/1,2 та виводиться з установки.

На основі наведеної інформації було складено таблицю поточкових даних, до якої увійшли необхідні потоки – таблиця 1.

Таблиця 1 – Поточкові дані установки

№	Найменування потоку	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	$M, \text{т/ч}$	$CP, \text{кВт/К}$	$\Delta H, \text{кВт}$
1	Гідроочищений компонент ДП	Гар	209	80	4,34	2,82	363
2	Циркуляційне зрошення К-1	Гар	160	62	33,13	20,72	2 030
3	Гідроочищений залишок ФР 360 з К-1	Гар	346	86	82,11	58,33	15 167
4	Охолоджуюча рідина з Е-128	Гар	24	21	23,00	12,14	36
5	Конденсація парів К-1	Гар	90	90	6,30	–	560
	Охолодження конденсату парів верху К-1	Гар	90	31	6,30	4,25	251
6	Нестабільний гідрогенізат	Хол	58	349	90,37	63,57	18 500

На основі відомих даних побудовано сіткову діаграму процесу – рис. 2. Тут технологічні потоки пов’язані рекуперативними теплообмінниками, а на потрібних позиціях розташовані утилітні теплообмінні апарати.

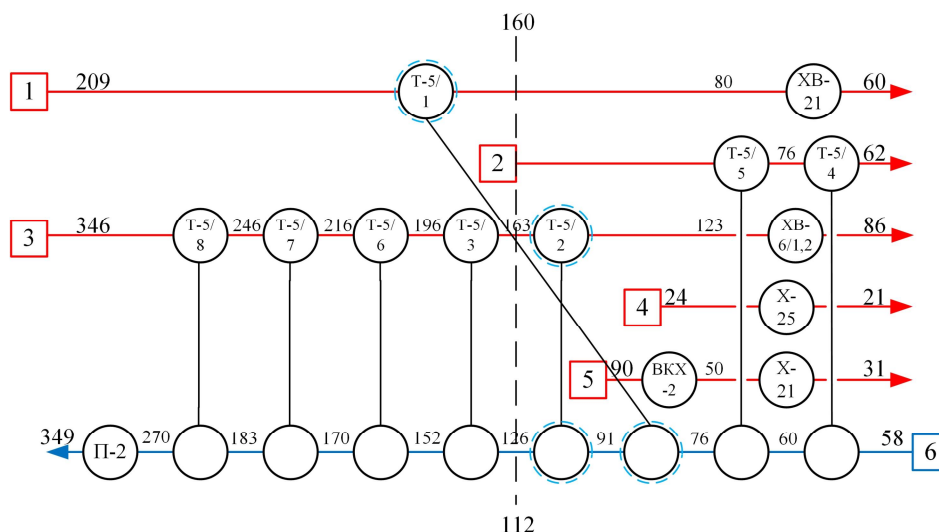


Рисунок 2 – Сіткова діаграма існуючого процесу

Додаткову інформацію можна отримати за допомогою побудови складових кривих процесу – рис. 3.

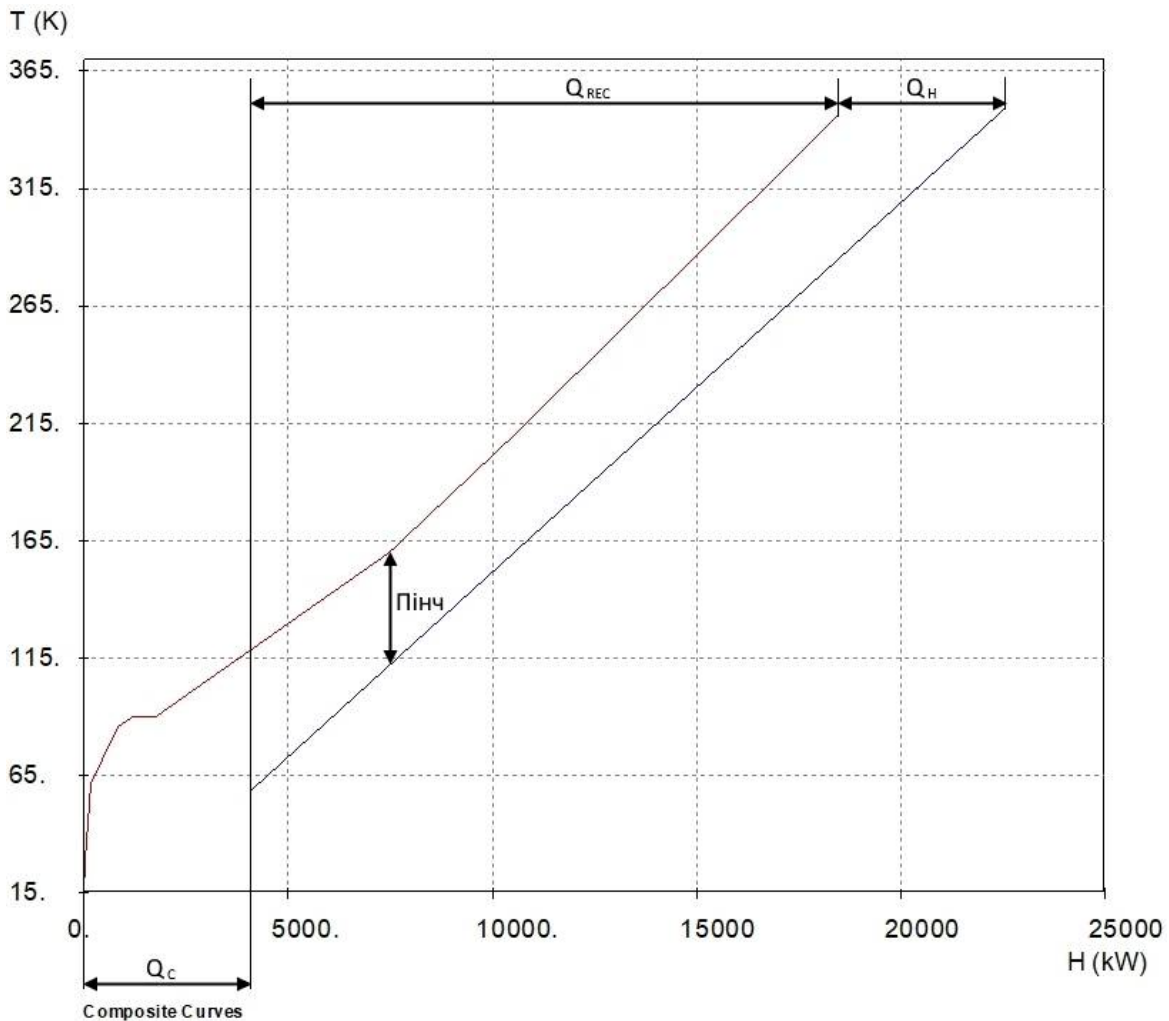


Рисунок 3 – Складові криві існуючого процесу

З рисунку 3 видно, що у системі наявна рекуперація величиною $\sim 14421,07$ кВт, гарячі утиліти становлять $Q_{Cmin}=4078,89$ кВт, а холодні складають $Q_{Cmin}=4042,17$ кВт. Пінч локалізується на наступних температурах: $T_{гар}=160$ °С та $T_{хол}=112$ °С. Різниця температур у області пінчу дорівнює 48 °С.

Наведене значення ΔT_{min} не є оптимальним – у системі присутній перехресний теплообмін, тобто відбувається переніс теплової енергії через пінч, через що на теплообмінних апаратах Т-5/1 та Т-5/2 спостерігаються різниці температур між теплоносіями, менші за 48 °С. Досягти оптимальних цільових значень можна за допомогою зменшення ΔT_{min} та зміни топології теплообмінної мережі [10, 11].

За допомогою програмного забезпечення «PINCH» отримане нове значення мінімальної різниці температур $\Delta T_{min}=15$ °С [12]. Складові криві для вказаної величини подані на рис. 4. З нього видно, що пінч локалізується на температурах 160 °С та 145 °С. При цьому величина гарячих утиліт становить близько $1980,95$ кВт, а холодних – біля $1944,23$ кВт. Рекуперація складає $16519,01$ кВт.

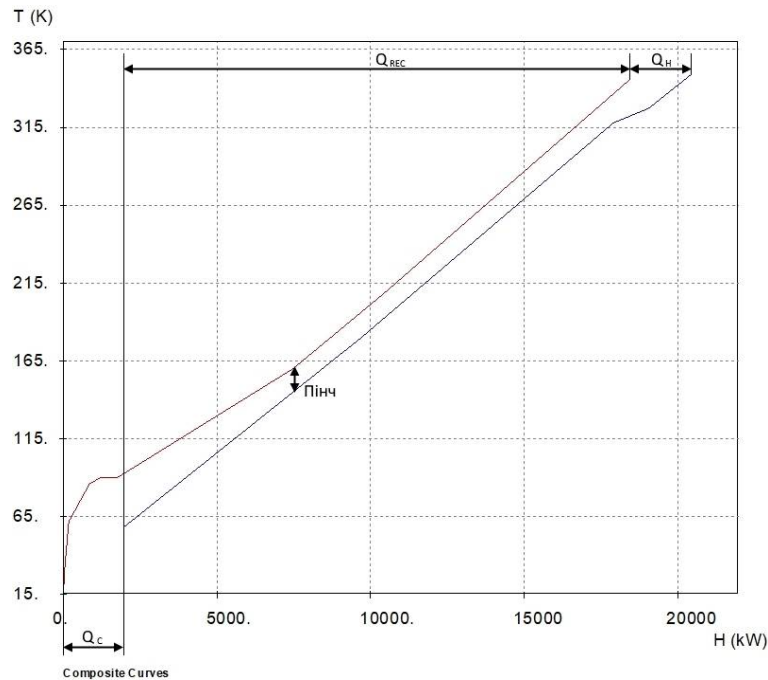


Рисунок 4 – Складові криві для інтегрованого процесу

Знаючи обидві пинч-температури та значення ΔT_{\min} , можна умовно розділити теплообмінну систему на дві підсистеми – вище та нижче пінча. У кожній з них розстановка нових рекуперативних та утилітних теплообмінників має відбуватися окремо: таким чином унеможлиблюється переніс теплової енергії через пінч та досягається ізоляція ділянок потоків, які знаходяться з певного боку від лінії розмежування.

Після низки побудов, розщеплень технологічних потоків за N- та CP-правилами [9, 10], обидві підсистеми поєднані у сіткову діаграму інтегрованого процесу – рис. 5.

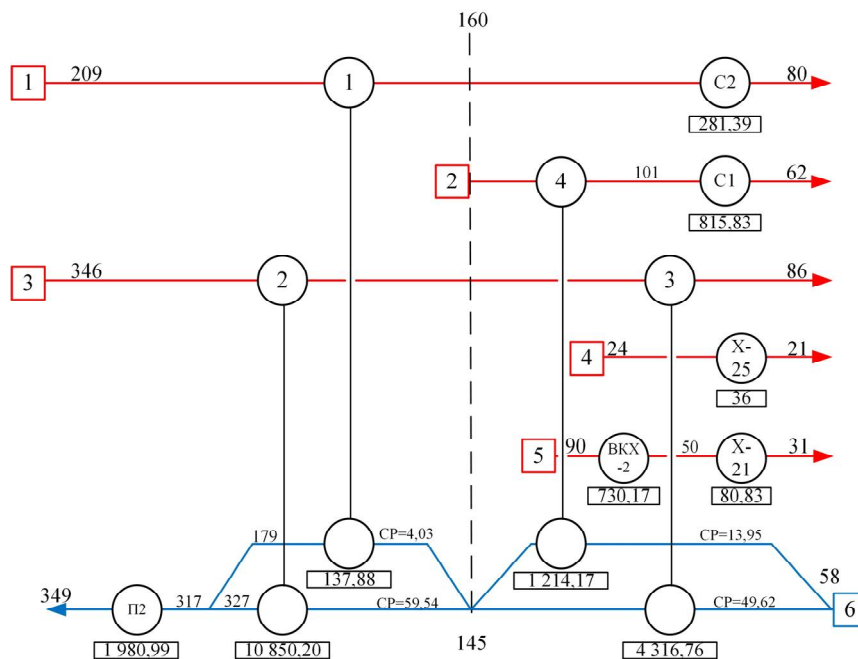


Рисунок 5 – Сіткова діаграма інтегрованого процесу

З розрахунків відомо, що у результаті інтеграції рекуперація теплової енергії у розглянутій теплообмінній системі збільшилася на 2097,94 кВт, а кожна з утиліт зменшилася на ту саму величину. Детальне порівняння енергетичних характеристик наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння енергетичних характеристик існуючої та інтегрованої мереж

Технологічна схема	Гарячі утиліти, кВт	Холодні утиліти, кВт	Рекуперація, кВт
Існуюча	4078,89	4042,17	14421,07
Інтегрована	1980,95	1944,23	16519,01

На основі наведених розрахункових даних спроектовано принципову схему теплообмінної системи блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу – рис. 6. У ній наявні чотири нових рекуперативних теплообмінника, три нових утилітних, а також збережено три старих апарати охолодження.

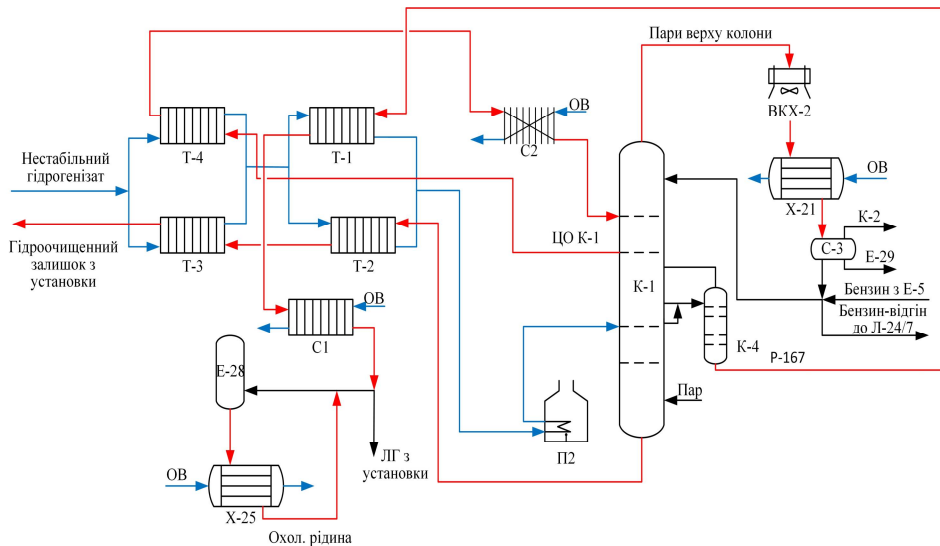


Рисунок 6 – Принципова схема проекту інтеграції системи теплообміну

Висновки

У роботі проаналізовано ефективність енергоспоживання у теплообмінній системі блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу, визначено потенціал енергозбереженні мережі та спроектовано нову принципову схему, отриману із застосуванням заходів рекуперації технологічних потоків. Для мінімальної різниці температур 15°C величина доступної рекуперації становитиме 16,52 МВт. При цьому обсяг необхідних для здійснення роботи підприємства теплоносіїв обох типів може бути зменшений на 51,5% від початкового значення.

Література

1. Tovazhyansky L.L. Application of process integration for energy saving and pollution reduction in Ukraine / L.L. Tovazhyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev et al. // Buda-

pest: PRES'99 Proceedings, ed. by F. Friedler and J. Klemes (Hungarian Chemical Society) – 1999. – PP. 659–664.

2. Renewable Energy: A Global Review of Technologies, Policies and Markets / Edited by D. Abmann, U. Laumanns and D. Uh – UK-US: Earthscan (Taylor & Francis), 2006. – 320 p.

3. Rodera N. A methodology for improving heat exchanger network operation / N. Rodera, D.L. Westphalen, H.K. Shethna // Applied thermal engineering – 2003. – № 23. – PP. 1729–1741.

4. Gundersen T. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks. An industrial review of the state of the art / T. Gundersen, L. Naess // Computer & Chemical Engineering – 1988. – № 12(6). – PP. 503–530.

5. Minimum utility usage in constrained heat exchanger networks. A transportation problem / J. Cerda, A. W. Westerberg, D. Mason et al. // Chemical Engineering Sciences – 1983. – № 38(3) – PP. 373–387.

6. Kapustenko P.O. Integration processes of benzene-toluene-xylene fraction, hydrogenation, hydrodesulphurization and hydrothermoprocessing on installation of benzene unit / P.O. Kapustenko, L.M. Ulyev, M.V. Ilchenko, O.P. Arsenyeva // Chemical Engineering Transactions – 2015. – Vol. 45. – PP. 235–240.

7. Morgan S. Use process integration to improve process designs and the design process / S. Morgan // Chemical engineering progress – 1992. – № 9. – P. 62–68.

8. Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks: Part I. Systematic generation of energy optimal networks / B. Linnhoff, J. R. Flower // American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE Journal), 1978. – № 24 (4). – PP. 633–642.

9. Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks: Part II: Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality / B. Linnhoff B., J. R. Flower // American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE Journal), 1978. – № 24 (4). – PP. 642–654.

10. Moodley A. Development of a unified mass and heat integration framework for sustainable design. An automated approach / A. Moodley, T. Majozi // Chemical Engineering Transactions – 2005. – № 7. – PP. 465–470.

11. Taal M. Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects / M. Taal, I. Bulatov, J. Klemes et al. // Applied Thermal Engineering – 2003. – № 23. – PP. 1819–1835.

12. Klemes J. Total Sites integrating renewables with extended heat transfer and recovery / J. Klemes, P. Varbanov // Heat Transfer Engineering – 2010. – № 31(9). – PP. 733–741.

УДК 66.045.12

Миронов А.М., Ільченко М.В.

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІННОЇ СИСТЕМИ БЛОКУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГІДРОГЕНІЗАТУ НА УСТАНОВЦІ ЛЕГКОГО ГІДРОКРЕКІНГУ

Роботу присвячено дослідженню теплообмінної системи блоку стабілізації гідрогенізату на установці легкого гідрокрекінгу задля визначення ступеню ефективності теплообміну та величини доступного потенціалу енергозбереження, а також для побудови модернізованої мережі теплообмінників технологічного процесу. У якості базового розрахунково-проектувального методу використаний пінч-аналіз. Для існуючої схе-

ми побудовано складові криві технологічних потоків та сіткову діаграму, визначено локалізацію пінча та наявну мінімальну різницю температур ΔT_{\min} . Для нового значення ΔT_{\min} розраховано можливу рекуперацію та величини холодних і гарячих утиліт, побудовано сіткову діаграму та принципову технологічну схему системи теплообміну процесу. Досягнену економію первинних енергоресурсів оцінено у 2,1 МВт, що складає близько 51,5% від початкового значення енергії зовнішніх теплоносіїв процесу.

Ключові слова: інтеграція процесів, пінч-аналіз, пінч-технології, рекуперація, складові криві, сіткова діаграма, гідрогенізат, гідрокрекінг.

Миронов А.Н., Ильченко М.В.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

Работа посвящена исследованию теплообменной системы блока стабилизации гидрогенизата на установке лёгкого гидрокрекинга для определения степени эффективности теплообмена и величины доступного потенциала энергосбережения, а также для построения модернизированной сети теплообменников технологического процесса. В качестве базового расчётно-проектировочного метода использован пинч-анализ. Для существующей схемы построены составные кривые технологических потоков и сеточная диаграмма, определены локализация пинча и имеющаяся минимальная разность температур ΔT_{\min} . Для нового значения ΔT_{\min} рассчитана возможная рекуперация и величины холодных и горячих утилит, построена сеточная диаграмма и принципиальная технологическая схема системы теплообмена процесса. Достигнутая экономия первичных энергоресурсов оценена в 2,1 МВт, что составляет около 51,5 % от начального значения энергии внешних теплоносителей процесса.

Ключевые слова: интеграция процессов, пинч-анализ, пинч-технологии, рекуперация, составные кривые, сеточная диаграмма, гидрогенизат, гидрокрекинг.

Myronov A.M., Ilchenko M.V.

INTEGRATION OF THE HYDROGENATE STABILIZATION UNIT HEAT EXCHANGE SYSTEM AT THE INSTALLATION OF LIGHT HYDROCRACKING

The work is devoted to the research of the heat exchanger system of the hydrogenation stabilizer unit at the installation of light hydrocracking in order to determine the degree of efficiency of heat exchange and the magnitude of the available energy saving potential, as well as to build a modernized network of heat exchangers of the technological process. Pinch analysis was used as the basic calculation and design method. The process composite curves and the grid diagram are constructed, pinch localization and the minimum temperature difference ΔT_{\min} are determined for the existing scheme. For the new value of ΔT_{\min} , the possible recovery and magnitudes of cold and hot utilities were calculated, a grid diagram and composite curves of the process heat transfer system were constructed. The achieved primary energy savings are estimated at 2.1 MW, which is about 51.5% of the initial energy value of the process's external coolants.

Keywords: process integration, pinch analysis, pinch technology, recuperation, component curves, grid diagram, hydrogenate, hydrocracking.

Мацегора О.І., аспірант, Арсеньева О.П., д.техн.н., професор, Товажнянський Л.Л., д.техн.н., професор, Капустенко П.О. к.техн.н., професор

МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ НАГРІВУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ

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

Ключові слова: поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, інтенсифікована поверхня теплопередачі, математична модель, пластинчатий теплообмінник.

Вступ

У багатьох промислових застосуваннях теплообмінного обладнання поверхні, що омиваються потоками які беруть участь в процесі теплообміну, схильні до забруднення відкладенням або іншими речовинами, що призводять до зміни поверхні теплопередачі і погіршення інтенсивності теплопередачі по цій поверхні. Це явище може значно погіршити інтенсивність процесу теплообміну і продуктивність теплообмінника, створюючи додатковий термічний опір шару відкладення. Більш того, зменшення площі поперечного перерізу каналів, частково блокованого відкладенням, може привести до значного збільшення падіння тиску в теплообміннику і, в кінцевому підсумку, до засмічення каналів. Згідно з аналізом різних публікацій, представлених в статті [1], консервативна оцінка забруднення теплообмінника призводить до висновку, що додаткові витрати на забруднення в промислово розвинених країнах становлять близько 0,25 % від валового внутрішнього продукту (ВВП). Забруднення також є причиною близько 2,5 % від загального еквівалентного антропогенного викиду вуглекислого газу. Економічна і екологічна важливість забруднення може бути класифікована за чотирма основними категоріями: (а) капітальні витрати, (б) витрати на електроенергію і вплив на навколишнє середовище, (в) втрати виробництва під час зупинок через забруднення і (г) витрати на технічне обслуговування.

В даний час «практичні рекомендації» для трубчастих теплообмінників, запропоновані ТЕМА [2], вимагають використання табличних значень опорів забруднення для різних технологічних рідин і води різної якості (див. таб. 1). Про фактори забруднення в компактних теплообмінниках з інтенсифікованою теплопередачею інформація більш бідна. Наприклад, деякі доступні дані для пластинчастих теплообмінників (ПТО) (див. таб. 1) представлені в книзі [3]. Всі значення опору відкладень для ПТО в таб. 1 приблизно в десять разів менше, ніж для кожухотрубних теплообмінників, і це підтверджено на практиці. Але точний прогноз забруднення в компактних теплообмінниках вимагає більш детального розуміння процесу забруднення і процедур обліку і зменшення різних типів забруднень.

1. Форми забруднень

Для обладнання, що передає тепло, на даний час визнано шість різних категорій механізмів забруднення в теплообмінниках, у т.ч. і компактних теплообмінниках (КТО):

1. Корозія;
2. Біологічне забруднення;
3. Хімічна реакція;
4. Заморожування;
5. Тверді частинки;
6. Утворення накипу (або кристалізація).

З цих 6-ти категорій Асоціацією виробників трубчастих теплообмінників ТЕМА [2] – п'ять визнаються основними механізмами забруднення, виключаючи заморожування. Короткий опис і основні особливості зменшення забруднення в КТО узагальнені нижче.

Таблиця 1 – Орієнтовні дані по термічному опорі відкладень

Рідина	Термічний опір в кожухотрубному теплообміннику, $m^2 K/W$	Термічний опір в ПТО, $m^2 K/W$
Вода:		
Демінералізована	0.00009	0.000009
Міська (м'яка)	0.00018	0.000017
Міська (жорстка)	0.00053	0.000043
Градирня (оброблена)	0.00018 - 0.00035	0.000034
Морська (прибережна)	0.00035	0.000043
Морська (океанічна)	0.00048	0.000026
Річна	0.00018 - 0.0007	0.000043
Рубашка охолодження	0.00035	0.000052
Олія мастильна	0.00018–0.00035	0.000017–0.000043
Олія рослинна	0.00053	0.000017–0.000052
Розчинник органічний	0.00018–0.00035	0.000009–0.000026
Пара	0.00009	0.000009
Технологічні рідини	0.00018–0.00088	0.000009–0.000052

Корозійне забруднення утворюється, коли матеріал поверхні теплопередачі може хімічно реагувати з компонентами рідини, що його омиває, утворюючи менш теплопровідний шар з продуктів корозії. Рідина також може переносити продукти корозії від інших частин системи далі по потоку, які осідають на поверхні теплопередачі.

Біологічне забруднення викликане відкладенням організмів, зважених в потоці рідини, на теплих поверхнях теплопередачі, де вони прикріплюються, ростуть і розмножуються. Широке дослідження біологічного забруднення були зроблені для харчової промисловості, особливо для молочної. Детальний огляд робіт з дослідження забруднення молока в теплообмінниках опубліковано в статті [4]. ПТО є кращим типом теплообмінників в таких умовах. Вони мають менше забруднення у порівнянні з трубчастими теплообмінниками, оскільки мають порівняно нижчу температуру поверхні і вище турбулентність потоку.

Забруднення в результаті хімічної реакції рідиною, в якій відбувається хімічна реакція між її компонентами, створюючи шар продуктів реакції на поверхні теплопередачі. Сам матеріал поверхні не бере участі в реакції. Ця форма забруднення зазви-

чай пов'язана з реакціями полімеризації, такими як, наприклад, коксування. Коли відкладення перетворюється з смоли в твердий кокс, його видалення дуже важке. Різні хімічні реакції можуть викликати забруднення в органічних розчинах. Вони включають автоокислення, полімеризацію і термічний розклад. Механізм забруднення сировою нафтою пов'язаний з хімічними реакціями, але він також поєднується з осадженням асфальтенів із залученням до процесу неорганічних компонентів.

Заморожування або затвердіння відкладення відбувається при охолодженні рідини нижче точки замерзання цієї рідини або деяких її компонентів на поверхні теплопередачі, що викликає затвердіння з осадженням твердої фази на поверхні. Щоб зменшити цю форму забруднення, потрібен чіткий контроль температури, при якому будь-який такий осад можна розплавити, якщо він навіть почав формуватися.

Осадження зважених в потоці частинок – це осадження на поверхні теплообміну частинок, утримуваних в суспензії в потоці рідини. Дрібні частинки зазвичай важче видалити, ніж більші, так як сили, що утримують їх разом і на поверхні, можуть бути більше. Цей тип відкладень легко видаляється механічно або за допомогою зворотного потоку. Встановлено, що утворення відкладень обумовлено конкуренцією між взаємодіями частинка-рідина, частинка-поверхня і частинка-частинка.

Утворення накипу відбувається, коли потік рідини містить деяку кількість розчиненої речовини, яка зі зміною умов осідає, утворюючи кристали, або безпосередньо на поверхні теплопередачі, або в обсязі рідини з подальшим осадженням на поверхні. У випадку води, що містить солі кальцію або магнію зі зворотною розчинністю, ці солі осідають з підвищенням температури на поверхнях нагріву. Найчастіше кристалізаційному забрудненню можна запобігти попередньою обробкою потоку рідини перед теплообмінником або додаванням хімікатів, які зменшують утворення відкладень.

2. Механізми відкладення забруднень

Більшість ситуацій забруднень в теплообмінниках пов'язані з різними формами забруднення, які можуть взаємодіяти і доповнювати одна одну. Наприклад, корозійне забруднення може ініціювати місця зародження для осадження забруднення частинками. Це створює труднощі в прогнозуванні та моделюванні процесу забруднення. Загальний процес відкладення включає в себе перенесення маси між об'ємною рідиною і поверхнею зі складними реакціями. Вплив напруги зсуву рідини на відкладення також впливає на загальну швидкість забруднення, якщо воно призводить до конвективного або дифузійного видалення відкладень. Забруднення в результаті хімічної реакції зазвичай включає наступний багатоетапний процес:



На всі процеси, які беруть участь у забрудненні, впливає структура потоку в каналах поблизу поверхні теплопередачі з відповідними значеннями турбулентності потоку і напруги зсуву. Можливі деталі механізму забруднення сировою нафтою на деякій інтенсифікованій поверхні теплопередачі наведені на рис. 1. Тут представлений конкретний механізм забруднення на прикладі переважно осадження або забруднення твердими частинками, деякі компоненти відсутні або ними можна знехтувати.

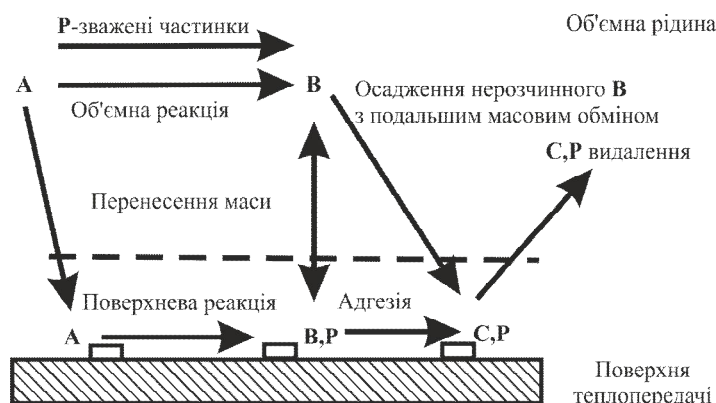


Рисунок 1 – Багатокомпонентний механізм забруднення

Відкладення – це динамічний процес, що розвивається в часі, і в залежності від конкретного випадку забруднення і природи залучених речовин його залежність від часу може значно відрізнитися. На рис. 2 представлені типові криві зміни в часі товщини відкладень забруднення (це може бути маса відкладень або тепловий опір забруднення, які залежать від часу аналогічним чином). На практиці гладкий вид кривих не реалізується, і вони виглядають аналогічно кривій D через стохастичний характер реального процесу забруднення.

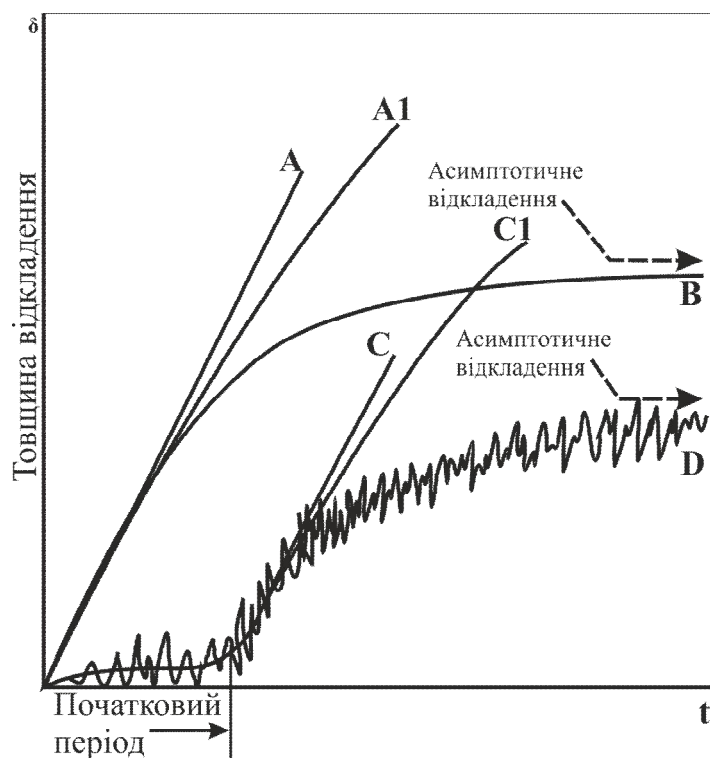


Рисунок 2 – Основні форми кривих відкладень

Крива А на рис. 2 відповідає постійній швидкості росту забруднення, коли товщина відкладення і його термічний опір лінійно збільшується з часом. Такі швидкості забруднення зустрічаються на практиці дуже рідко, і в основному спостерігаються в лабораторних дослідженнях для експериментів, недостатньо тривалих, щоб свідчити

про зниження швидкості забруднення у міру зростання відкладень. Крива **В** показує асимптотичну поведінку відкладення, при якому швидкість утворення відкладень зменшується з часом, і стає рівним нулю, коли досягається асимптота. Така поведінка безпосередньо впливає з теоретичного підходу Керна і Сітона [5], в якому процес забруднення представлений як одночасна дія процесів осадження та видалення забруднень. Асимптотичне значення опору відкладення досягається коли швидкості осадження і видалення відкладення рівні. Поступове збільшення товщини осаду призводить до зміни температури на його кордоні з рідиною, яка омиває його, а також до зміни міцності матеріалу осаду. Це може привести як до зменшення швидкості осадження, так і до збільшення швидкості видалення при кінцевій їх рівності при досягненні асимптотичних умов забруднення.

Існують чотири основні процеси, які контролюють утворення і накопичення забруднення, а саме: (1) перенесення маси, (2) осадження, (3) видалення і (4) старіння.

Перенесення маси відповідає за доставку до поверхні теплопередачі прекурсорів забруднення, які зважені або розчинені в об'ємі рідини. Це може бути реалізовано шляхом дифузійного або конвективного масопереносу.

Осадження забруднення відбувається, коли прекурсори забруднень потрапляють на поверхню теплопередачі і утримуються на ній або реагують на її поверхні, утворюючи речовини, які прилипають до поверхні. Деяка частина прекурсорів або продуктів їхньої реакції може покинути поверхню.

Видалення деякого осадженого матеріалу забруднення з зовнішньої межі шару відкладення викликано дією напруги зсуву рідини і масопереносу. Інтенсивність видалення відкладень з зовнішньої поверхні залежить від міцності нанесеного шару, напруги зсуву і величини масопереносу.

Старіння осадженого матеріалу забруднення відбувається після досить тривалого часу його формування, особливо при тривалому впливі високої температури. Під час старіння міцність відкладень може збільшуватися при полімеризації, перекристалізації або інших процесах.

Основними факторами, що впливають на забруднення, є: температура поверхні; температура об'єму рідини; швидкість потоку (через напругу зсуву на поверхні шару забруднень) і склад рідини. Для обліку цих чинників були розроблені різні моделі виникнення забруднень, які в основному застосовні до конкретних типів забруднень і переважним механізмам відкладення забруднень.

3. Моделі утворення забруднень

Розроблено чотири основні категорії моделей, засновані на різних особливостях процесу відкладення: реакція і перенесення, початковий період, старіння і порогові моделі.

3.1 Моделі реакції і перенесення

Для багатьох механізмів відкладень в літературі опубліковані різні моделі реакції і перенесення. На тлі розроблених моделей і отриманих рівнянь вони демонструють значні відмінності, проте, всі моделі перевірені з деяким набором експериментальних даних, що показують досить гарне узгодження з результатами моделювання. Важливість ефектів масопереносу в швидкості осадження пояснюється об'єднанням compone-

нта масопереносу з виразом Арреніуса для швидкості хімічної реакції в рівнянні швидкості осадження. Такі моделі включають в термін осадження компонент транспортування, виражений, наприклад, в моделі запропонованої Епштейном [6].

3.2 Моделі початкового періоду

Більшість моделей забруднення орієнтовані на швидкість осадження, коли збільшується термічний опір відкладення, не враховуючи початок процесу осадження, якій може початися з деякою затримкою. Згідно Мюллеру-Штейнхагену [7], ця затримка дуже рідкісна для механізму осадження зважених часток, але в багатьох випадках для інших типів забруднення відкладенню передують ініціація (або початковий період), в якій відкладення тільки починає розвиватися, і немає значної зміни термічного опору, який можливо спостерігати з плином часу. Емпірична оцінка часу ініціювання відкладення з розчинів сульфату кальцію під час теплопередачі при кипінні була запропонована в роботі [8], в рамках феноменологічної моделі для прогнозування термічного опору відкладення. Підхід до включення періоду ініціації в загальну феноменологічну модель кристалізаційного забруднення з урахуванням інших періодів зростання забруднення також був запропонований в роботі [9]. Аналізуючи період ініціації, дослідники прийшли до висновку, що існує область, в якій термічний опір відкладення дорівнює нулю для чистої поверхні, а потім стає навіть негативним, коли прекурсори починають формуватися на теплообмінній поверхні випадковим чином. Поверхня стала шорсткою, що призвело до збільшення конвективного теплообміну в деякій частині початкового періоду виникнення відкладення і деякого невеликого збільшення загального коефіцієнта теплопередачі, що виглядає як деяке зниження теплового опору відкладення. У міру зростання наступних областей відкладення і їх асимптотичної поведінки крива відкладення набуває S-подібну форму, як крива D на рис. 2.

3.3 Моделі старіння

Багато з відкладень забруднень піддаються старінню протягом значних періодів часу. Це може збільшити міцність осаду за рахунок полімеризації, перекристалізації, зневоднення і т.і. Для обліку явищ, при яких відкладення зазнає подальші зміни в своєму складі і властивостях при тривалому впливі високих температур поверхні, Кріттенден і Колачковський [10] представили двошарову модель відкладення. Один шар може являти собою свіже забруднення, а інший – відкладене. Пізніше ця двошарова концепція отримала подальший розвиток в роботі [11].

3.4 Моделі порогового забруднення

Широкі експериментальні дослідження на дослідних установках і в лабораторіях по вивченню забруднень в теплообмінниках, що використовуються для попереднього нагріву сирої нафти в установках дистиляції сирої нафти, встановили, що при деяких умовах теплообмінники можуть не забруднюватися. Це особливо цікаво, оскільки, якщо знайти і підтримувати такі сприятливі умови в теплообміннику, проблема забруднення в кінцевому підсумку вирішується. Розбираючись з цим явищем, Еберт і Панчяят [12] спочатку представили концепцію моделей «порогового забруднення» для забруднення сировою нафтою всередині трубок кожухотрубних теплообмінників. Порогові моделі забруднення вимагають оцінки включених емпіричних параметрів відповідно до наявних наборів даних про забруднення сировою нафтою. Для складної геометрії каналу в роботі [13] запропонували використовувати модель Еберта-Панчяята з виразом осадження через коефіцієнт тепловіддачі. Щоб поширити модель забруднення на труби з

вставками та іншими каналами складної геометрії, Ян і Кріттенден [14] запропонували інший підхід. Для вираження осадження було введено поняття «еквівалентної швидкості», яке означає швидкість в круглій трубі без покриття того ж еквівалентного діаметра і з такою же напругою зсуву стінки, як середня напруга зсуву стінки в розглянутому каналі складної геометрії. Ця концепція була успішно використана для прогнозування швидкості забруднення в трубах з дротяними вставками HiTRAN.

4. Втрата тиску, пов'язана із забрудненням

Крім погіршення тепловіддачі забруднення є причиною збільшення втрат тиску в теплообмінниках. Зростаючі відкладення призводять до часткового зменшення поперечного перерізу каналу і формування певної форми шорсткості на поверхні відкладень. Однак, з огляду на невизначеність (в самих моделях забруднення, значеннях коефіцієнта теплопровідності, шорсткості поверхні і т. і.), метод не гарантує високу точність. У будь-якому випадку результати повинні бути скориговані на основі порівняння з наявними вимірами перепаду тиску на місці.

5. Забруднення на інтенсифікованих теплообмінних поверхнях

Аналіз різних методів інтенсифікації теплообміну показав, що всі ці методи засновані на значних змінах в структурі потоку, що призводять до збільшення інтенсивності передачі тепла, маси і імпульсу. Підвищення коефіцієнтів тепловіддачі супроводжується збільшенням конвективної дифузії між поверхнею теплопередачі і обсягом рідини, збільшенням і перерозподілом уздовж поверхні напруги зсуву. Ці явища грають важливу роль в описаних вище механізмах і моделях відкладень, які можуть привести до значної різниці в швидкостях осадження відкладень на різних поліпшених поверхнях і в гладких трубах.

5.1 Забруднення в трубах зі штучною шорсткістю

Ряд авторів досліджували забруднення в інтенсифікованих трубах з різними формами штучної шорсткості. Результати цих досліджень і судження про інтенсивність осадження забруднень, в порівнянні з гладкими трубами, досить різні. Аналізуючи опубліковані в літературі експериментальні дані, Панчайт і Кнудсен [15] відзначили, що для деяких форм штучної шорсткості (наприклад, спірально-реберних труб) зниження продуктивності протягом одного року склало близько 10 % в порівнянні з 15–25 % для гладких труб. За іншими даними, асимптотичний опір забруднення для труб з поздовжніми ребрами був на 15–30 % більше, ніж для гладких труб, але для спірально-реберних труб воно було на 25–50 % нижче. Незважаючи на те, що термічний опір забруднення і швидкість забруднення в деяких інтенсифікованих трубах навіть більше, ніж в гладких, інші з них виявляють великий потенціал для зниження забруднення. Це вимагає обережного підходу для розширеного застосування таких труб для середовищ, що мають великі тенденції до забруднення, з оцінкою можливого впливу забруднення на загальну продуктивність теплообмінника з такими трубами.

5.2 Забруднення в трубах зі вставками

Вдосконалені труби зі штучною шорсткістю показали різні тенденції забруднення в порівнянні з гладкими трубами в різних середовищах, від збільшення забруднення до значного зменшення, в залежності від геометрії штучної шорсткості. Річі та Дроге-мюллер в роботі [16] пропонують детальний огляд областей застосування і переваг трубних вставок в теплообмінниках. Вставка може вплинути як на температуру, так і на

напругу зсуву на стінці труби і тому успішно застосовується при забрудненнях в нафтовій промисловості. За допомогою цього елемента можна збільшити коефіцієнт теплопередачі плівки з боку труби до 4 разів.

5.3 Забруднення в каналах ПТО

Починаючи з публікації про забруднення в ПТО [17], з прикладами рекомендованих термічних опорів забруднення, представлених в таб. 1, значне зниження швидкості осадження забруднення на стінках каналів ПТО можна розглядати як встановлений факт. Оцінка асимптотичної величини термічного опору забруднення була запропонована Товажнянським і Капустенко [18] на основі аналогії Рейнольдса для передачі тепла і імпульсу. Відповідно напруга зсуву на стінці пов'язано з коефіцієнтом теплопередачі плівки. Досвід проектування і експлуатації ПТО показує, що коефіцієнти теплопередачі плівки в ПТО зазвичай в два, три і більше разів вище, ніж в кожухотрубних теплообмінниках, і навіть при менших еквівалентних діаметрах вони мають значно менший термічний опір забруднень. Про значне зменшення забруднення в зварному ПТО СОМРАБЛОК, що працює для нагріву сирої нафти в лінії попереднього нагріву повідомлялося в статті [19]. Був запропонований метод для моделювання та інтеграції поведінки забруднення в цих теплообмінниках. Було показано, що це хороший інструмент для їх подальшого проектування, оскільки напруги зсуву, створювані рідинами в цих теплообмінниках, можуть бути досить високими, щоб мінімізувати забруднення.

Забруднення холодною водою в ПТО було комплексно досліджено при засміченні твердими частинками з води каналів ПТО [20]. Експерименти проводилися для каналів ПТО, сформованими комерційно виробленими пластинами з кутом нахилу гофри 60° і 30°. Згодом спостерігалася асимптотична поведінка термічного опору забруднення, а також сильний вплив швидкості потоку. Процес забруднення сульфатом кальцію був досліджений в роботі [21] для ПТО з комерційно вироблених пластин. Кут нахилу гофри становив 60°.

Значне зменшення забруднень у ПТО порівняно з трубчатими теплообмінниками було відмічене в роботі [22] де відзначений значний вплив на термічний опір забруднень швидкості руху теплоносія та напруги зсуву на стінці пластин.

6. Моделювання процесу забруднення поверхні ПТО

Автори роботи [14] запропонували розширення застосування своєї моделі, розробленої для гладких труб, до забруднень в трубах з вставками поліпшуючими теплообмін. Ця модель була розширена на канали ПТО в роботі [23] шляхом введення залежності від напруги зсуву і перевірена в умовах промисловості. Подібність впливу напруги зсуву у каналах ПТО та трубах з поліпшенням тепловіддачі до такого впливу у гладких трубах було доведено експериментально в роботі [24]. Це дозволяє розробку моделей формування забруднень у ПТО шляхом модифікації моделей забруднень розроблених для поверхонь іншої геометричної форми. Для цього можуть бути використані кореляційні рівняння для гідравлічного опору в каналах ПТО наведені в роботі [25] та методики розрахунку тепловіддачі робіт [26] та [27]. Як це доведено в роботі [28], підвищити точність розрахунку термічного опору забруднень в ПТО можливо на базі математичного моделювання процесу з урахуванням зміни його локальних параметрів. Подальша розробка цих методів потрібна для доробки методики розрахунку ПТО [29] з урахуванням впливу забруднень на інтенсивність процесу теплопередачі.

Висновки

Забруднення поверхні теплопередачі негативно впливає на роботу теплообмінного обладнання. Для апаратів з поліпшеною тепловіддачею, таких як ПТО, точне врахування такого впливу має підвищену важливість. Термічний опір забруднень в ПТО набагато менший за такий у трубчатих теплообмінниках. Для правильного його урахування потрібно уточнення методики розрахунку ПТО шляхом модифікації існуючих моделей росту забруднень в трубах. Для цього можливо використати результати досліджень гідравлічного опору та тепло переносу в чистих каналах ПТО та отримані кореляційні рівняння. Підвищення точності методик розрахунку ПТО з урахуванням забруднень можливо з урахуванням зміни локальних параметрів процесу в їх каналах.

Література

1. Crittenden B., Yang M. 2011: Technical review of fouling and its impact on heat transfer. Report on project FP7-SME-2010-1 262205/ INTHEAT. <http://intheat.dcs.unipannon.hu/wp-content/uploads/2011/11/D1.2.pdf> (Accessed 10.10.2014).
2. TEMA. 2007. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9th edn., TEMA Inc., New York.
3. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015, Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
4. Bansal B., Chen X.D. 2006. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 5: 27–33.
5. Kern D.Q., Seaton R.E. 1959. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling. *British Chem. Engrn.* 4: 258–262.
6. Epstein N. 1983. Fouling of heat exchangers. In *Heat Exchangers: Theory and Practice* (J. Taborek, G. F. Hewitt and N. Afgan, eds.), 795-815. Hemisphere, Washington DC, USA.
7. Muller-Steinhagen H. M. 1999. Cooling water fouling in heat exchangers. *Advances in heat transfer* 33: 415–495.
8. Malayeri, M. R. and Muller-Steinhagen, H., 2007. Initiation of CaSO_4 scale formation on heat transfer surface under pool boiling conditions, *Heat Transfer Engineering* 28: 240–247.
9. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu J. 2006. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Applied Thermal Engineering* 26: 440–447.
10. Crittenden B.D. and Kolaczowski S. T. 1979b. Energy savings through the accurate prediction of heat transfer fouling resistances. In *Energy for Industry*, P. W. O'Callaghan (Ed.), Pergamon, Oxford, 1979; 257–266.
11. Ishiyama E.M., Paterson W.R., Wilson D.I. 2011. Optimum cleaning cycles for heat transfer equipment undergoing fouling and ageing. *Chemical Engineering Science* 66 (4): 604–612.
12. Ebert W.A., Panchal C.B. 1997. Analysis of Exxon crude slip stream coking data, in: C.B. Panchal, et al. (Eds.), *Fouling Mitigation of Industrial Heat-Exchange Equipment*, Begell House. New York. USA. 451–460.

13. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. 2002. Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery preheat trains. *Applied Thermal Engineering* 22: 777–788.
14. Yang M., Crittenden B. 2012. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts. *Applied Energy* 89: 67–73.
15. Panchal C.B., Knudsen J.G. 1998. Mitigation of Water Fouling: Technology Status and Challenges. *Advances in Heat Transfer* 31: 431–474.
16. Ritchie J.M., Droegemueller P. 2008. Application of tube inserts in heat exchangers: benefits of tube inserts. In: Hewitt G.F., editor. *Heat exchanger design Handbook*. Begell House, Redding, CT; [Section 3.21.2].
17. Marriott J. 1971. Where and how to use plate heat exchangers. *Chemical Engineering* 78 (8): 127–134
18. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. 1984. Intensification of heat and mass transfer in channels of plate condensers. *Chemical Engineering Communications* 31 (6): 351–366.
19. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.
20. Karabelas A.J., Yiantsios S.G., Thonon B., and Grillot J.M. 1997. Liquid side fouling of Heat Exchangers. An Integrated R&D Approach for Conventional and Novel Designs. *Applied Thermal Engineering* 7 (8-10): 727–737.
21. Bansal B., Muller-Steinhagen H., Chen X.D. 2000. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling — investigation with an in-line filter. *Chemical Engineering and Processing* 39: 507–519.
22. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., 2007, Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chemical Engineering Transactions*, 12, 207–212.
23. Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A., 2018, Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory. *Applied Thermal Engineering*, 128: 1074–1081.
24. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Harris J., Klochok O., Arsenyeva O., Kapustenko P., 2015, Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. *Heat Transfer Engineering*. 36 (7-8): 741–749.
25. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
26. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
27. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2014, Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
28. Kapustenko P., Klemeš J., Arsenyeva O., Matsegora O., Vasilenko O., 2018, Accounting for local features of fouling formation on PHE heat transfer surface. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12(4): 619–629.
29. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*. 18, 791–796.

УДК 66.021.4

Мацегора О.І., Арсеньева О.П., Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О.

МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ НАГРІВУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Представлені основні чинники забруднення на теплопередаючих поверхнях. Розглянуті моделі, що контролюють процес утворення і накопичення забруднення, яке провокує розвиток термічного опору шару забруднення і втрату тиску за рахунок зменшення поперечного розрізу каналу. Проаналізовано моделі розвитку забруднення в часі на інтенсифікованих теплообмінних поверхнях та їх використання для математичного моделювання процесу забруднення в ПТО, з урахуванням зміни локальних параметрів, що підвищить точність розрахунків впливу забруднень на інтенсивність процесу теплопередачі.

Ключові слова: поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, інтенсифікована поверхня теплопередачі, математична модель, пластинчатий теплообмінник.

Мацегора А.И., Арсеньева О.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А.

МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Представлены основные факторы загрязнения на теплопередающих поверхностях. Рассмотрены модели, контролирующие процесс образования и накопления загрязнения, которое провоцирует развитие термического сопротивления слоя загрязнения и потери давления за счет уменьшения поперечного сечения канала. Проанализированы модели развития загрязнения во времени на интенсифицированных теплообменных поверхностях и их использование для математического моделирования процесса загрязнения в ПТО, с учетом изменения локальных параметров, что повысит точность расчетов влияния загрязнений на интенсивность процесса теплопередачі.

Ключевые слова: поверхность теплопередачі, загрязнение поверхности теплопередачі, интенсифицированная поверхность теплопередачі, математическая модель, пластинчатый теплообменник.

Matsegora O.I., Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O.

MODELS OF FOULING'S FORMATION ON THE HEATING SURFACES AND THEIR APPLICATION FOR PLATE HEAT EXCHANGERS

The main fouling factors on heat transfer surfaces are presented. Models are tested that control the process of formation and accumulation of pollution, which provokes the development of thermal resistance of the pollution layer and pressure loss by reducing the cross section of the channel. The models of the development of pollution over time on intensified heat-exchange surfaces and their use for mathematical modeling of the pollution process in PHE are analyzed, taking into account changes in local parameters, which will increase the accuracy of calculating the effect of pollution on the intensity of the heat transfer process.

Keywords: heat transfer surface, fouling of heat transfer surface, intensified heat transfer surface, mathematical model, plate heat exchanger.

Пересьолков О.Р., к.техн.н., доцент, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ТЕОРЕТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ З ВЕНТИЛЯТОРНОЮ ГРАДИРНЕЮ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: охолоджувальний вузол, оборотне водопостачання, вентиляторна градирня, інтенсифікація роботи, підвищена температура зовнішнього повітря, температура охолодженої води

Системи оборотного водопостачання з вентиляторними градирнями широко використовуються для охолодження теплотехнологічного обладнання різних підприємств. Стабільність їх роботи визначає ефективність роботи усього технологічного циклу підприємства. В останній час з'явилася певна кількість робіт, що присвячена теоретичному й експериментальному визначенню ефективності вентиляторних градирень та деяким питанням їх модернізації [1–7]. Але важливим представляється отримання інформації про ефективність охолодження існуючих градирень, які працюють при параметрах зовнішнього повітря, що відрізняються від розрахункових. Особливо це стосується підвищених кліматичних умов.

З потеплінням клімату температура зовнішнього повітря в літні місяці вдень піднімається до 35 °С і вище. Це ускладнює роботу водоохолоджувачів і призводить до недоохолодження оборотної води в градирні. В результаті можливе порушення технологічного процесу роботи основного устаткування (холодильних установок, компресорних станцій, конденсаторів, плавильних індукційних печей і т.і.). Екстремальні природні умови особливо позначаються на параметрах роботи градирень з великим терміном експлуатації. Свого часу такі градирні проектувалися для кліматичних умов, рекомендованих будівельними нормами [8, 9].

Розглянемо порядок дослідження параметрів роботи охолоджувального вузла діючої системи оборотного водопостачання (СОВ), що складається з теплообмінного апарату, на який подається охолоджуюча вода, вентиляторної градирні, резервуарів теплої й охолодженої води й насосів.

Етап 1. Визначення максимальної температури охолоджувальної води $t'_в$, при якій можлива експлуатація теплообмінного апарату й, відповідно, всього технологічного комплексу.

Середній температурний напір в теплообмінному апараті Δt_{cp} визначається з рівняння передачі в ньому теплоти [10]

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

де Q – теплове навантаження; k – коефіцієнт передачі теплоти; F – площа теплопередавальної поверхні стандартного теплообмінника.

З іншої сторони,

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_M}}, \quad (2)$$

де $\Delta t_{\delta} = t''_T - t'_B$, $\Delta t_M = t'_T - t''_B$; t'_T и t'_B – температури гарячого теплоносія й охолоджуючої води на вході в теплообмінний апарат; t''_T и t''_B – температури теплоносіїв на виході з апарату.

Кінцева температура охолоджуючої води на виході з теплообмінника

$$t''_B = t'_B + \Delta t_T,$$

де Δt_T – нагрів охолоджуючої води в теплообміннику, який може бути знайдений як

$$\Delta t_T = \frac{Q}{G_B \cdot c_B}.$$

Тут G_B – масова витрата охолоджуючої води, c_B – питома теплоємність води.

Спільне рішення рівнянь (1) і (2) щодо Δt_{cp} дозволяє знайти значення t'_B . Задаючись значеннями температури t'_B , послідовними наближеннями необхідно домогтися збігу значень Δt_{cp} , знайденого з рівняння (1) і (2) з точністю до 0,5 %. Знайдене таким чином значення t'_B , а отже, $t''_B = t'_B + \Delta t_T$, є вихідними для розрахунку охолоджуючої здатності градирні при різних параметрах зовнішнього повітря.

Подібні міркування корисні при проектуванні нових теплообмінників. Якщо площа обраного стандартного теплообмінного апарату є дещо завищеною, то відповідно до рівняння (1), його експлуатація можлива при меншому температурному напорі Δt_{cp} , а, відповідно, при більш високій максимально допустимій температурі охолоджуючої води. Це сприяє переходу на більш високий температурний рівень циклу системи оборотного водопостачання. При цьому активізується як конвективний теплообмін між водою і повітрям, так й інтенсивність випарного охолодження, тобто задане теплове навантаження можливо передати в атмосферу при дещо меншому об'ємі (висоті) зрошувача. Це положення розрахунковим шляхом з'ясовано авторами цієї роботи і відповідає також висновкам роботи [11].

У розглянутому в цій роботі прикладі розрахункове значення максимальної температури охолоджувальної води, яка подається на теплообмінний апарат, $t'_B = 24,5$ °C; $\Delta t_T = 9,5$ °C, відповідно, $t''_B = 34$ °C.

Етап 2. Розрахунок охолоджувальні здатності вентиляторної градирні.

СОВ обладнана протиточною вентиляторною градирнею, що складається з трьох секцій площею в плані $F'_{op} = 4 \times 4 = 16$ м² кожна. Градирня встановлена на рівні землі. Зрошувач градирні двох'ярусний, виконаний з хвилястих азбестоцементних листів з горизонтальними гофрами, крок між $S = 24,8$ мм, висота зрошувача $h = 2,44$ м. Параметри зрошення $A = 0,72$; $m = 0,61$ [8].

В даний час подібні градирні знаходяться в експлуатації на багатьох підприємствах, тому аналіз роботи градирень такого типу для екстремальних температурних умов клімату є досить актуальним.

При розрахунку градирні визначається об'єм і висота зрошувача відповідно до

методики [12]. Градирня буде забезпечувати необхідне охолодження заданої витрати води G_v при відповідних метеорологічних умовах, якщо розрахункова висота її зрошувача h_{op} не перевищує висоти зрошувача h стандартної градирні, що розглядається.

Методика розрахунку [12] представлена наступними рівняннями.

Рівняння передачі теплоти від води до повітря в зрошувачі градирні

$$Q = \beta_{xv} \cdot V_{op} \cdot k \cdot \Delta I_{cp}, \quad (2)$$

де β_{xv} – об'ємний коефіцієнт масовіддачі, середній за об'ємом зрошувача, що відноситься до різниці вологовмісту, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}/\text{кг} \text{ сух. повітря})$; V_{op} – об'єм зрошувача, м^3 ; k – поправочний коефіцієнт, який враховує зменшення витрати води через її випаровування, $k = \frac{1 - c_{pж} t_{ж2}}{r}$; r – теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$, ΔI_{cp} – середня різниця значень питомих ентальпій вологого повітря, тобто різниця значень питомих ентальпій насиченого повітря в пограничному шарі у поверхні плівки води, що стікає зрошувачем I'' , й ентальпії повітря в ядрі потоку між пластинами зрошувача I , $\text{кДж}/\text{кг} \text{ сух. повітря}$.

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі визначається як

$$\beta_{xv} = A \cdot \lambda^m \cdot g_{ж}, \quad (3)$$

де $g_{ж}$ – густина зрошування, $(\text{кг}/\text{с} \cdot \text{м}^2)$; $\lambda = G_v/G_{ж}$ – відношення масової витрати повітря до масової витрати води; коефіцієнти A і m є постійними для обраної конструкції зрошувача.

Середня різниця ентальпій представлена як

$$\Delta I_{cp} = \frac{(I_1'' - I_2) - (I_2'' - I_1)}{\ln \frac{(I_1'' - I_2)}{(I_2'' - I_1)}}. \quad (4)$$

Розрахункова висота зрошувача h_{op} , що необхідна для забезпечення заданого теплов'язу й охолодження води,

$$h_{op} = V_{op} / F_{op},$$

де F_{op} – площа зрошувача в плані, м^2 .

У розрахунках були розглянуті чотири режими при наступних параметрах зовнішнього повітря:

Режим 1: температура зовнішнього повітря $\theta_1 = 25$ °С, відносна вологість $\varphi = 52$ %, температура за мокрим термометром $\tau = 18,6$ °С.

Режим 2: $\theta_1 = 30$ °С; $\varphi = 35$ %; $\tau = 19$ °С.

Режим 3: $\theta_1 = 33$ °С; $\varphi = 33$ %; $\tau = 21,2$ °С.

Режим 4: $\theta_1 = 35$ °С; $\varphi = 30$ %; $\tau = 22,5$ °С.

На рис. 1 показані розрахункові значення необхідної висоти зрошувача h_{op} для забезпечення охолодження води в градирні до розрахункової максимально допустимої

температури охолодженої води (в розглянутому прикладі ця температура дорівнює 24,5 °С). Номери точок відповідають режимам, що розглядаються.

Як видно з рис. 1, вже при температурі зовнішнього повітря більш 31 °С необхідна глибина охолодження забезпечена не буде.

Доцільно отримані результати стосовно охолоджувальної здатності градирні представити у вигляді залежності температури охолодженої води t_2 при відповідних розрахункових параметрах зовнішнього повітря. Для отримання такої залежності була розроблена методика, описана в етапі 3.

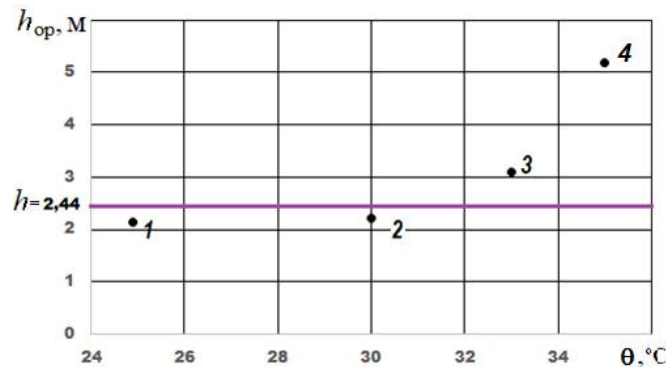


Рисунок 1 – Залежність необхідної висоти зрошувача від параметрів зовнішнього повітря (режими 1-4)

Етап 3. Аналіз роботи пристрою води при різних параметрах зовнішнього повітря.

Приймаємо в якості припущення лінійну залежність ентальпії насиченого повітря біля поверхні плівки води I'' за висотою зрошувача $h_{ор}$, як показано на рис. 2.

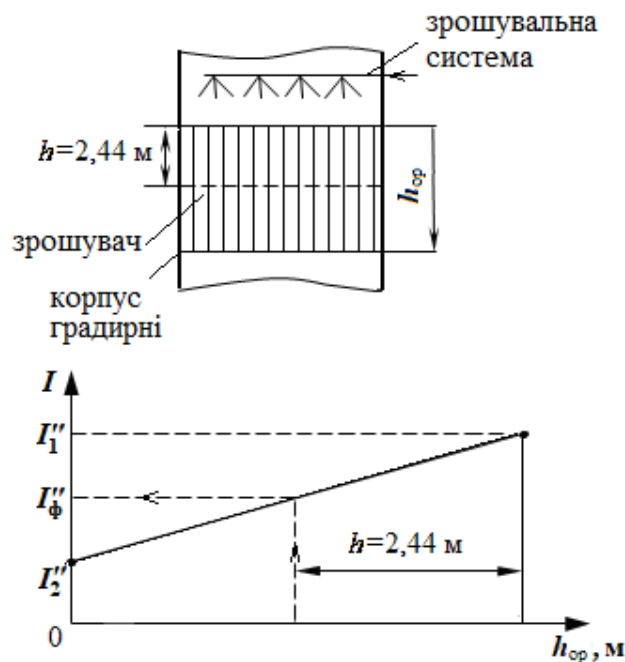


Рисунок 2 – До розрахунку фактичної температури охолоджуючої води на виході з градирні

При проходженні плівки води вниз по зрошувачу відстань, що дорівнює висоті зрошувача стандартної градирні (в нашому прикладі $h = 2,44$ м) за графіком $I'' = f(h_{\text{оп}})$ (рис. 2), отримуємо фактичне значення ентальпії $I''_{\text{ф}}$. Параметри повітря в прикордонному шарі у плівки води, що стікає по зрошувачу $\theta''_{\text{ф}} = t_{2\text{ф}}$ і $\varphi'' = 100\%$, отже за $I-d$ діаграмою можна знайти фактичне значення температури недоохолодженої води $t_{2\text{ф}}$, яка виходить із зрошувача стандартної градирні. На рис. 3 показано значення температури $t_{2\text{ф}}$, яка визначена відповідно до викладеної методики.

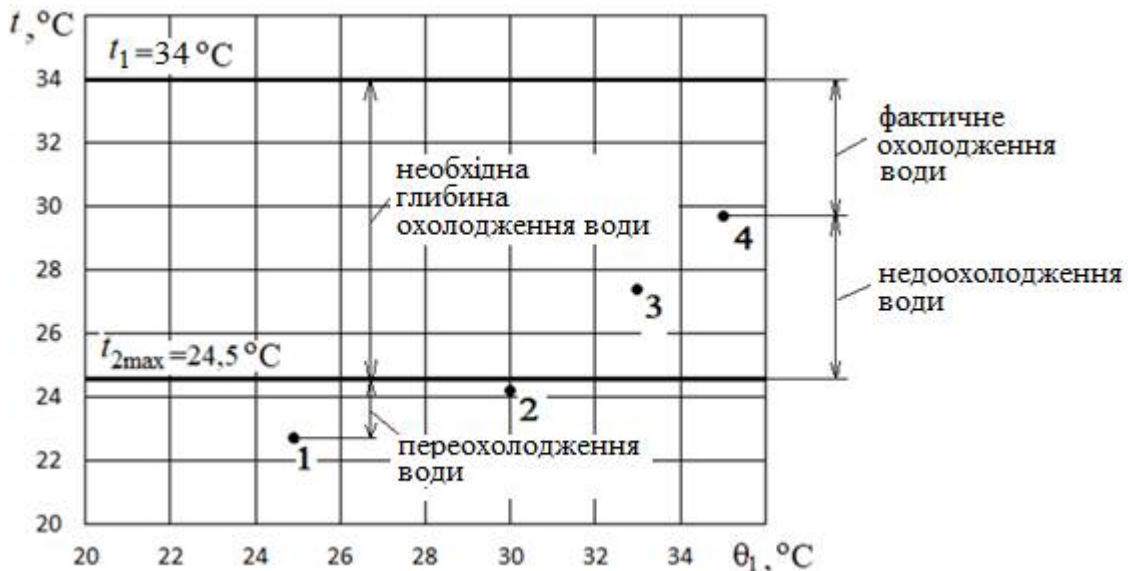


Рисунок 3 – Розрахункові значення температури охолоджуючої води для обраних режимних параметрів зовнішнього повітря

Етап 4. Аналіз можливості інтенсифікації роботи градирні при екстремальних параметрах зовнішнього повітря.

Розглянемо рівняння (3) для розрахунку об'ємного коефіцієнта масовіддачі $\beta_{\text{хв}}$. Так, збільшення витрати повітря і, відповідно, коефіцієнта λ^m призводить до зростання $\beta_{\text{хв}}$ й інтенсивності охолодження. При цьому необхідно також враховувати зростання аеродинамічного опору елементів градирні.

Вентилятори типу ВГ мають кілька позицій кута установки лопаток (наприклад, 10, 15 і 20 градусів), більший кут повороту відповідає більшій витраті повітря, аеродинамічний опір градирні також зростає. При цьому забезпечується можливість експлуатації охолоджувального вузла при підвищенні температури повітря до 31–33 °С.

На рис. 4 показано вплив кута установки лопаток вентилятора α на температуру охолодженої води.

Ефективність роботи градирні, у відповідність з рівнянням (3), також збільшується зі зростанням густини зрошення $g_{\text{ж}}$. При цьому потрібно враховувати кілька факторів. По-перше, збільшення густини зрошення не повинно призводити до «захлинання» зрошувача. «Захлинання» цілком можливо при використанні пластмасових зрошувачів з відносно невеликим проміжком між листами, але для зрошувачів з азбестоцементних листів при кроці їх установки 25–55 мм воно набагато менш небезпечно.

По-друге, збільшення витрати води не повинно призводити до збільшення нерівномірності локальної густини зрошення, особливо під повнофакельними форсунками, що мають орієнтацію на подачу води вниз. Таке локальне збільшення витрати води в

окремих точках поперечного перерізу зрошувача при збільшенні середнього значення густини зрошення не сприяє збільшенню ефективності охолодження води, що також було відзначено в роботі [10].

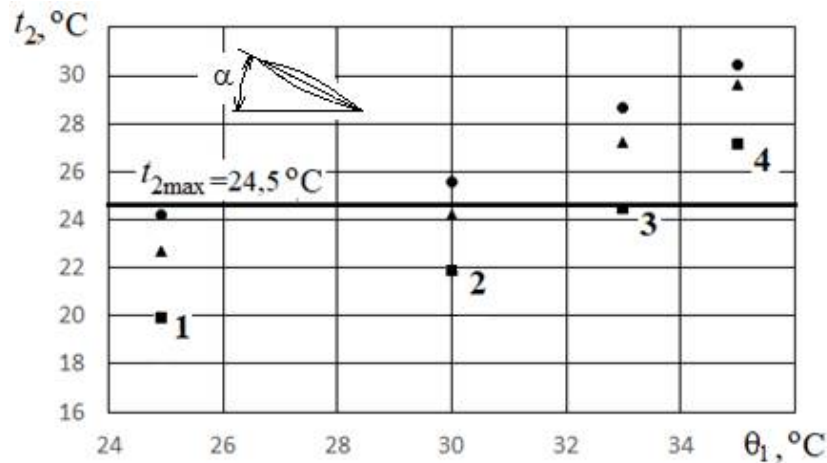


Рисунок 4 – Значення температури охолодженої води t_2 при різних кутах α установки лопатів осьового вентилятора градирні та розглянутих режимах зовнішнього повітря:
 • – $\alpha=10^\circ$; ▲ – $\alpha=15^\circ$; ■ – $\alpha=20^\circ$

По-третє, при збільшенні витрати води через градирню витрата води через теплообмінний апарат не повинна збільшуватися. Це можна реалізувати, зокрема, відводом надлишку охолодженої води в резервуар теплої води, тим самим розбавляючи її та знижуючи її температуру, що, в свою чергу, повинно дещо поліпшити умови роботи градирні. Аналогічне рішення також можливе при установці в СОВ додаткової градирні.

На рис. 5 показано вплив густини зрошення $g_{ж}$ на охолоджувальну здатність градирні.

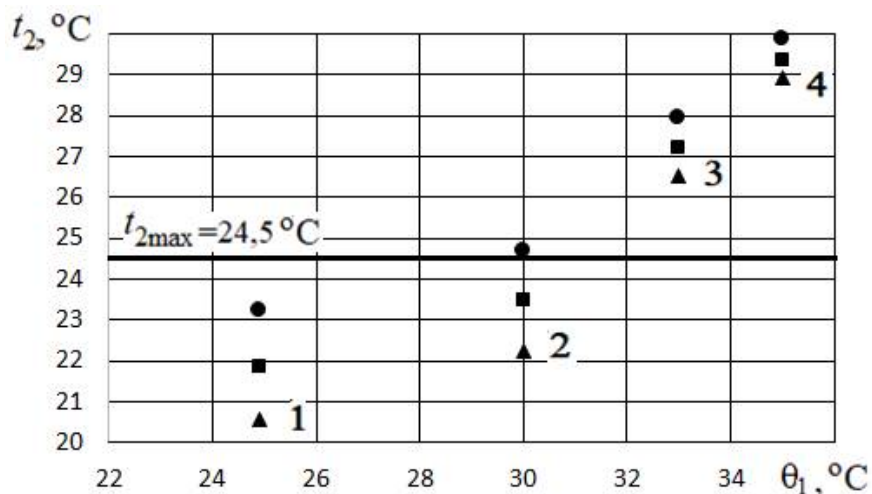


Рисунок 5 – Значення температури охолодженої води при різних густинах зрошення (режими 1-4):

• – $g_{ж} = 8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; ■ – $g_{ж} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; ▲ – $g_{ж} = 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

Як видно, завдяки такому рішенню можливо забезпечення нормальної роботи

охолоджувального вузла до температур зовнішнього повітря 31–32 °С.

Висновки. Розглянуто порядок дослідження параметрів роботи системи оборотного водопостачання. Запропоновано методику визначення максимальної температури охолоджувальної води, при якій можлива експлуатація теплообмінного апарату, тим самим визначаються вихідні параметри для розрахунку охолоджувальної здатності градирні.

Розроблено методику розрахунку градирні з визначення необхідного об'єму, а відповідно, й висоти зрошувача. Представлені результати розрахунку різних режимних параметрів роботи, в яких температура зовнішнього повітря змінювалася від 25 до 36 °С.

Розроблено методику та виконано розрахунки фактичної температури охолоджуючої води на виході з градирні для стандартної висоти зрошувача.

Виконано аналіз можливої інтенсифікації роботи градирні за рахунок збільшення витрати повітря при повороті лопатів вентилятора від 10 до 20 градусів.

Проаналізовано поліпшення охолодження води в градирні при збільшенні густини зрошення від 8 до 12 м³/(м² год). Показано, як реалізувати це рішення при наявності резервуарів теплої і холодної води.

Отримані результати дозволяють прогнозувати режим роботи градирні та основної технологічної установки при довільних розрахункових параметрах зовнішнього повітря.

Література

1. Лаптев А.Г., Ведьгаева И.А. Устройство и расчет промышленных градирен: Монография. Казань: КГЭУ, 2004. 180 с.
2. Колесник В.В., Орлик В.Н., Зеленцов В.В. Анализ работы градирен с распылительными форсунками // Химическая промышленность. 2001. №10. С. 12–16.
3. Крюков О.В. Повышение энергоэффективности водооборотных систем предприятий при оптимизации управления градирнями // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2016. № 19. С. 5-27.
4. Сосновский С.К., Кравченко В.П. Пути повышения эффективности работы вентиляторных и башенных градирен // Холодильна техніка і технологія. 2013. № 4 (144). С. 51–60.
5. Даутов Р.Г., Вилохин С.А. Повышение эффективности процесса охлаждения в градирнях // Вестник Казанского технического университета. 2013. №5. С. 190–192.
6. Галустов В.С. Оптимизация систем оборотного потребления охлаждающей воды // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2005. №7. С. 42–45.
7. Кологривов М.М., Бузовский В.П. Эффективность работы промышленных контактных аппаратов // Холодильна техніка та технологія. 2014. № 2 (148). С. 60–63.
8. Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. Вентиляторные градирни. М.: Стройиздат. 1976. 216 с.
9. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофизика / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1983. 136 с.
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
11. Сосновский С.К., Кравченко В.П. Термодинамические циклы и правила регулирования систем оборотного водоснабжения с испарительными охладителями. Хо-

лодильна техніка та технологія. 2015. Т. 51. Вип. 6. С. 51–60.

12. Расчеты вентиляторных градирен: метод. указания для курсового и дипломного проектирования / А.Р. Переселков, О.В. Круглякова. Харьков: НТУ «ХПИ». 2016. 56 с.

Bibliography (transliterated)

1. Laptev A.G., Vedgaeva I.A. Ustroystvo i raschet promyshlennyh gradiren: Monografiya. Kazan': KGEU, 2004. 180 p.

2. Kolesnik V.V., Orlik V.N., Zelencov V.V. Analiz raboty gradiren s raspylitelnyimi forsunkami // Himicheskaya promyshlennost. 2001. №10. P. 12–16.

3. Kryukov O.V. Povyshenie energoeffektivnosti vodooborotnyh sistem predpriyatiy pri optimizacii upravleniya gradirnyami // Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravleniya. 2016. # 19. P. 5–27.

4. Sosnovskiy S.K., Kravchenko V.P. Puti povysheniya effektivnosti raboty ventilyatornyh i bashennyh gradiren // Holodilna tehnika i tehnologiya. 2013. № 4 (144). P. 51–60.

5. Dautov R.G., Vilohin S.A. Povyshenie effektivnosti processa ohlazhdeniya v gradirnyah // Vestnik Kazanskogo tehniceskogo universiteta. 2013. №5. P. 190–192.

6. Galustov V.S. Optimizaciya sistem oborotnogo potrebleniya ohlazhdayushey vody // Santehnika. Otoplenie. Kondicionirovanie. 2005. №7. P. 42–45.

7. Kologrivov M.M., Buzovskiy V.P. Effektivnost raboty promyshlennyh kontaknyh apparatov // Holodilna tehnika ta tehnologiya. 2014. № 2 (148). P. 60–63.

8. Gladkov V. A., Arefev Yu. I., Ponomarenko V. S. Ventilyatornye gradirni. M.: Strojizdat. 1976. 216 p.

9. SNiP 2.01.01-82 Stroitel'naya klimatologiya i geofizika / Gosstroj SSSR. M.: Strojizdat, 1983. 136 p.

10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha. M.: Energiya, 1975. 488 p.

11. Sosnovskij S.K., Kravchenko V.P. Termodinamicheskie cikly i pravila regulirovaniya sistem oborotnogo vodosnabzheniya s isparitelnyimi ohladitelyami. Holodilna tehnika ta tehnologiya. 2015. Т. 51. Vip. 6. P. 51–60.

12. Raschet ventilyatornyh gradiren: metod. ukazaniya dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya / A.R. Pereselkov, O.V. Kruglyakova. Kharkov: NTU «KhPI». 2016. 56 p.

УДК 66.045.53

Переселков О.Р., к.техн.н., доцент, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ТЕОРЕТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ З ВЕНТИЛЯТОРНОЮ ГРАДИРНЕЮ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО ПОВІТРЯ

Вентиляторні градирні є широко поширеними в системах оборотного водопостачання промислових підприємств різного призначення. Їх робота в істотній мірі визначається параметрами зовнішнього повітря. З потеплінням клімату робота градирень

ускладнюється, що призводить до недоохолодження оборотної води й порушення технологічного процесу роботи основного устаткування. Екстремальні природні умови особливо позначаються на умовах роботи градирень, що мають великий термін експлуатації.

Для охолоджувального вузла діючої системи оборотного водопостачання, який складається з охолоджуваного теплообмінного апарату, вентиляторної градирні та резервуарів теплої й охолодженої води пропонується методика теоретичного аналізу ефективності його охолодження.

На першому етапі визначається максимальна температура охолоджуючої води, при якій можлива експлуатація теплообмінного апарату і, відповідно, всього технологічного комплексу.

Далі для заданих параметрів зовнішнього повітря знаходиться охолоджуюча здатність градирні, яка в даній постановці задачі визначається необхідною висотою зрошувача заданого типу, на якій відбудеться охолодження води до заданого рівня. Для ефективної роботи градирні розрахована висота зрошувача не повинна перевищувати проектну. Також запропонована методика знаходження фактичної температури води на виході зі зрошувача градирні при підвищених параметрах зовнішнього клімату.

Як приклад представлені результати розрахунку режимних параметрів роботи трьохсекційної градирні в діапазоні температур зовнішнього повітря від 25 до 36 °С.

Аналіз системи розрахункових рівнянь дозволив запропонувати рекомендації щодо інтенсифікації роботи градирні. Отримані результати дозволяють прогнозувати режим роботи вентиляторних градирень та основної технологічної установки при довільних параметрах зовнішнього клімату.

Ключові слова: охолоджувальний вузол, оборотне водопостачання, вентиляторна градирня, інтенсифікація роботи, підвищена температура зовнішнього повітря, температура охолодженої води.

Переселков А.Р., к.техн.н., доцент, Круглякова О.В., к.техн.н., доцент

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Вентиляторные градирни широко распространены в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий различного назначения. Их работа в существенной мере определяется параметрами наружного воздуха. С потеплением климата работа градирен осложняется, что приводит к недоохлаждению оборотной воды и нарушению технологического процесса работы основного оборудования. Экстремальные природные условия особенно сказываются на условиях работы градирен, имеющих большой срок эксплуатации.

Для охладительного узла действующей системы оборотного водоснабжения, который состоит из охлаждаемого теплообменного аппарата, вентиляторной градирни и резервуаров теплой и охлажденной воды предлагается методика теоретического анализа эффективности его охлаждения.

На первом этапе определяется максимальная температура охлаждающей воды, при которой возможна эксплуатация теплообменного аппарата и, соответственно, всего технологического комплекса.

Далее для заданных параметров наружного воздуха находится охлаждающая

способность градирни, которая в данной постановки задачи определяется необходимой высотой оросителя заданного типа, на которой произойдет охлаждение воды до заданного уровня. Для эффективной работы градирни расчетная высота оросителя не должна превышать проектную. Также предложена методика нахождения фактической температуры воды на выходе из оросителя градирни при повышенных параметрах наружного климата.

В качестве примера представлены результаты расчета режимных параметров работы трехсекционной градирни в диапазоне температур наружного воздуха от 25 до 36 °С.

Анализ системы расчетных уравнений позволил предложить рекомендации по интенсификации работы градирни. Полученные результаты позволяют прогнозировать режим работы вентиляторных градирен и основной технологической установки при произвольных параметрах внешнего климата.

Ключевые слова: охлаждающий узел, обратное водоснабжение, вентиляторная градирня, интенсификация работы, повышенная температура наружного воздуха, температура охлажденной воды.

Pereselkov A.R., Kruglyakova O.V.

METHODICAL ASPECTS OF THE THEORETICAL RESEARCH OF THE RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEM WITH A FAN COOLING TOWER UNDER THE INCREASED TEMPERATURE OF OUTDOOR AIR

Mechanical draught cooling towers are widespread in water recycling systems of various industrial enterprises. Their work is significantly determined by the outdoor air parameters. With climate warming, the operation of cooling towers becomes more complicated, and this leads to undercooling of the circulating water and disruption of the technological process of the main equipment. Extreme environmental conditions especially affect the operating conditions of cooling towers with a long service life.

For the cooling unit of the existing circulating water supply system, which consists of a cooled heat exchanger, a mechanical draught cooling tower and tanks of warm and chilled water, a methodology for theoretical analysis of the cooling efficiency is proposed.

At the first stage, the maximum temperature of the cooling water is determined at which the operation of the heat exchanger and, accordingly, the entire technological complex is possible.

Next, for the given parameters of the outdoor air, the tower cooling capacity is found. The task considered supposes that the cooling capacity is determined by the required height of the given type cooling tower fill, at which water is cooled to a necessary level. For effective operation of the cooling tower, the calculated height of the tower fill should not exceed the design one. A methodology is also proposed for finding the actual water temperature at the outlet of the cooling tower fill under increased parameters of the external climate.

As an example, the results of calculating the operational parameters of the three-section cooling tower in the range of outdoor temperatures from 25 to 36 °С are presented.

Analysis of the system of calculation equations makes it possible to offer recommendations for intensifying the cooling tower operation. The results obtained allows predicting the operation mode of the mechanical draught cooling towers and the main technological unit under external climate arbitrary parameters.

Key words: cooling unit, recycling water supply, mechanical draught cooling tower, operation intensifying, increased outdoor temperature, cooling water temperature.

Григоров А.Б., к. техн. н., доцент

ТЕХНОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА НАФТОВОГО ШЛАМУ В ПЛАСТИЧНІ МАСТИЛА

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

Ключові слова: пластичне мастило, нафтовий шлам, висококипляча фракція, термічна деструкція, полімерний загущувач, захисні властивості.

Вступ. Утилізацію промислових відходів, у загальному розумінні, можна розглядати, як певну стадію життєвого циклу будь-якого товарного продукту, який в силу певних обставин (промислового браку, втрати певних властивостей після використання тощо) вже не може застосовуватися за своїм призначенням, та піддається переробці для отримання іншої продукції або поховання (знищення, депонування, знешкодження).

Переробка промислових відходів у інші продукти, що застосовуються у енергетиці, яка включає в себе комплекс найскладніших технологічних процесів та використовує сучасне обладнання, є більш ефективним підходом до утилізації у порівнянні з їх похованням на спеціальних полігонах [1, 2]. Одним з масових відходів нафтовидобувної і нафтопереробної промисловості є нафтовий шлам (НШ) – небезпечний для навколишнього середовища і здоров'я людини відхід, що накопичується в резервуарах, ємностях і трубопроводах під час проведення різних технологічних операцій [3, 4]. У загальному вигляді, НШ складається з води, механічних домішок (пісок, сульфідів та оксидів металів) і вуглеводневої частини [5], яка може бути використана, як цінна вторинна сировина для багатьох технологічних процесів.

Технологія переробки НШ. На сьогоднішній день, переробка НШ, в основному, спрямована на отримання з нього технологічного палива [6, 7] та бітумів в'язучих [8, 9]. Однак в роботі [10] було запропоновано отримання на його основі пластичних мастил, що на нашу думку, є маловивченим і вельми перспективним напрямком його переробки. Тоді, розглянемо схему переробки НШ, яка буде включати в себе кілька послідовних стадій, і дозволяє отримати в якості товарного продукту пластичні мастила (див. рис. 1). Першою стадією будь-якої схеми переробки НШ є його поділ на воду (потік I), механічні домішки (потік II) і вуглеводневу частину (потік III). Вода відправляється на біологічну очистку, після чого надходить або в заводську каналізацію, або повертається в технологічний процес, де використовується для охолодження парів в теплообмінній апаратурі. Виділені механічні домішки використовують як наповнювач у виробництві будівельних матеріалів різного функціонального призначення.

Вуглеводнева частина, яка становить, в середньому, 25–75 % мас., поступає на термічну деструкцію у реактор, що працює при температурі до 450 °С і атмосферному тиску. У реакторі з неї утворюється до 5 % мас. газів деструкції (потік V), 55–80 % мас. вуглеводневої фракції п.к. – 360 °С (потік IV) і 16–40 % мас. фракції, яка википає при температурі > 360 °С (потік VI).

Гази деструкції представлені вуглеводнями C₁-C₃ і можуть бути використані для отримання теплової енергії, необхідної для обслуговування установки. Вуглеводнева

фракція п.к. – 360 °С, може використовуватися, як компонент півного і котельного палива, зокрема для зменшення в'язкості і зниження температури застигання топкового мазуту. Фракція, що википає при температурах > 360 °С за величиною кінематичної в'язкості відповідає індустріальним товарним оливам І-50 і І-70., тобто значення кінематичної в'язкості, виміряний при 50 °С, знаходиться в межах 45–70 мм²/с [11]. У зв'язку з цим вона може бути використана в якості дисперсійного середовища при виробництві пластичних мастил.

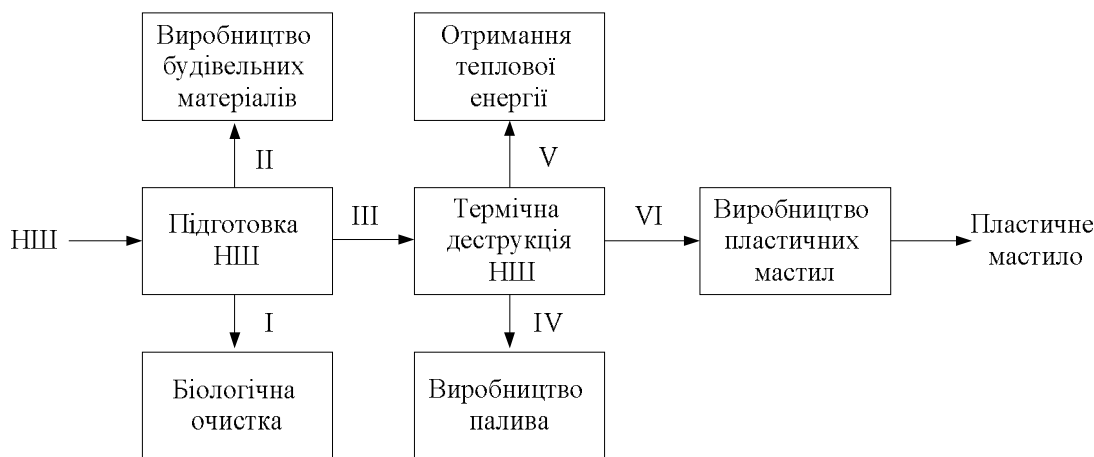


Рисунок 1 – Структурна схема виробництва пластичних мастил з НШ:

І - вода; ІІ – механічні домішки; ІІІ – широка вуглеводнева фракція; ІV – вуглеводнева фракція (п.к. – 360°С); V – гази деструкції; VI – фракція >360°С

Однак, висококипляча фракція деструкції вуглеводневої частини НШ, в своєму складі містить ненасичені вуглеводні [12], які з часом починають інтенсивно окислюватися, що зумовлюватиме зміну структури та експлуатаційних властивостей мастила, що отримано на її основі. Цьому сприяє присутність кисню повітря і дія температури. Отже, для отримання антифрикційних пластичних мастил цю фракцію необхідно піддати глибокому очищенню, що призведе до збільшення виробничих витрат, що виникають при реалізації запропонованої схеми. В цьому випадку, економічно доцільно використовувати отриману фракцію без попереднього очищення для виробництва пластичних мастил, призначених для захисту від атмосферної корозії металевих поверхонь.

Лабораторні дослідження. За запропованою схемою в лабораторних умовах, були отримані пластичні мастила, загущувачем в яких виступали 2 % мас. поліетилену низького тиску (ПЕНД) і поліпропілену (ПП). Для отриманих проб відповідно до вимог нормативної документації визначалися показники якості, що дозволяють оцінити можливість їх використання в якості консерваційних пластичних мастил (див. табл. 1).

Наведені результати свідчать про те, що отримані мастила повністю придатні для використання їх в якості водостійких, консерваційних мастил в області температур до 85 °С, в разі загущення ПЕНД і до 110 °С, при загущенні ПП.

Висновки. Проведені дослідження показали, що високотемпературна фракція (t кип > 360 °С), отримана термічною деструкцією нафтового шламу в апараті реакторного типу, що працює при атмосферному тиску, може бути використана як дисперсійне середовище для виробництва пластичних мастил. Додавання 2 % мас. полімерного за-

гущувача (поліетилену низького тиску і поліпропілену) в висококиплячу фракцію дозволяє отримати пластичні мастила, які за своїми основними властивостями можуть бути використані в діапазоні робочих температур до 85 °С, в разі загущення ПЕНД і до 110 °С, при загущенні ПП, як консерваційні мастила для захисту від атмосферної корозії, металевих поверхонь техніки, агрегатів і окремих вузлів, при їх тривалому зберіганні на відкритих майданчиках.

Таблиця 1 – Результати лабораторних досліджень

№ п/п	Найменування показника	Числові значення для проб	
		Зразок №1	Зразок № 2
1	Вид загущувача	ПЕНД	ПП
2	Пенетрація, мм 10 ⁻¹	336	361
3	Клас по NLGI	1	0
4	Температура крапання, °С	85	110
5	Корозійний вплив на метал (мідь)	Відсутній	
6	Захисні властивості (сталь 3)	Витримує	
7	Водостійкість	Витримує	

Література

1. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. OJ L 152, 11.6.2008, p. 1–44. Latest consolidated version: 18/09/2015. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) Text with EEA relevance. OJ L 334, 17.12.2010, p. 17–119. Latest consolidated version: 06/01/2011. ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>.
3. Deng S. Experimental and modeling study of the long cylindrical oily sludge drying process / S. Deng, X. Wang, H. Tan, // Applied Thermal Engineering. – 2015. – №91. – pp. 354–362.
4. Hu G. A combination of solvent extraction and freeze thaw for oil recovery from petroleum refinery wastewater treatment pond sludge / G. Hu, J. Li, H. Hou // Journal of Hazardous Materials. – 2015. – № 283. – pp. 832–840.
5. Olufemi Adebayo Johnson. Petroleum sludge treatment and disposal: A review / Olufemi Adebayo Johnson, Augustine Chioma Affam // Environmental Engineering Research. – 2019. – 24(2). – pp. 191–201.
6. Chen, M. New Technology and Development Direction of Harmless and Resource-based Treatment of Oily Sludge / M. Chen, Z. Liu, X. Wang, Z. Xu // Pet. Nat. Gas Chem. Ind. – 2011. – № 40. – pp. 313–317.
7. Pyrolysis of API separator sludge / P. Pramf, M. Vissanu, K. Chatvalee, R. Pramoch, R. Thirasak, K. Boonyarach // J. Anal. Appl. Pyrolysis. – 2003. – №68–69. – pp. 547–560.
8. Karami E. Upgrading Iranian petroleum sludge using polymers / E. Karami, T. Jafari Behbahani // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Volume 8. – Issue 4. – pp. 1319–1324.

9. Kuriakose A.P. Bitumenous paints from refinery sludge / A.P. Kuriakose, S. Kochu Baby Manjooran // *Surface and Coatings Technolgy*. – 2001. – Volume 145. – Issues 1–3. – pp. 132–138.

10. Mardupenko Aleksey. Oil sludge as source of a valuable carbon raw material / Aleksey Mardupenko, Andrey Grigorov, Irina Sinkevich, Alena Tulskaaya // *Petroleum & Coal journal*. – 2018. – Volume 60. – Issue 3. – pp. 353–357.

11. Школьников В.М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: [Справочник]. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ». –1999. – 596 с.

12. Thermal Transformation of Carbon and Oxygen-Containing Organic Compounds in Sewage Sludge During Pyrolysis Treatment / Yanjun Hu, Yanjun Lu, Wenchao Ma, Linjie Wang, Haryo Wibowo, Zhicheng Huang, Fan Yu // *Energies*. – 2019. – №12(12). – 2258.

УДК 665.765: 621.89.017

Григоров А.Б.

ТЕХНОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА НАФТОВОГО ШЛАМУ В ПЛАСТИЧНІ МАСТИЛА

Запропоновано схему технологічної переробки нафтової шламу шляхом отримання з нього за допомогою термічної деструкцією висококиплячої вуглеводневої фракції з температурою кипіння вище $> 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ і яка має величину кінематичної в'язкості, що відповідає індустріальним товарним оливам I-50 і I-70 (значення кінематичної в'язкості, що вимірюється при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, знаходиться у межах $45\text{--}70\text{ мм}^2/\text{с}$), яка може бути використана як дисперсійне середовище у виробництві пластичних мастил. При її загущенні 2 % мас. подрібненими полімерними відходами з поліетилену низького тиску (ПЕНТ) і поліпропілену (ПП) можна отримати продукти, які за своїми властивостями відповідають пластичним мастилам: класифікація за NLGI, відповідає 0 (напіврідке мастило) і 1 (м'яке мастило); верхня межа діапазону робочих температур відповідає $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $110\text{ }^{\circ}\text{C}$; відсутність корозійного впливу на метал (наприклад, мідь); високі захисні властивості, (для сталі, марки 3). Завдяки своїм властивостям отримані продукти можна використовувати як консерваційні пластичні мастила, призначені для захисту від атмосферної корозії металевих поверхонь.

Ключові слова: пластичне мастило, нафтовий шлам, висококипляча фракція, термічна деструкція, полімерний загущувач, захисні властивості.

Григоров А.Б.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЯНОГО ШЛАМА В ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ

Предложена схема технологической переработки нефтяного шлама путем выделения из него при помощи термической деструкцией высококипящей углеводородной фракции, выкипающей при температурах выше $>360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и имеющей величину кинематической вязкости соответствующую индустриальным товарным маслам И-50 и И-70

(значение кинематической вязкости, измеренное при 50 °С, находится в пределах 45–70 мм²/с), которая может быть использована как дисперсионная среда в производстве пластичных смазок. При ее загущении 2 % масс. измельченными полимерными отходами из полиэтилена низкого давления и полипропилена можно получить продукты, которые по своим свойствам соответствует пластичным смазкам: классификация по NLGI, соответствует 0 (полужидкая смазка) и 1 (мягкая смазка); верхний предел диапазона рабочих температур соответствует 85 °С и 110 °С; отсутствие коррозионного воздействия на металл (например, медь); высокие защитные свойства, (для стали, марки 3). Благодаря своим свойствам полученные продукты можно использовать как консервационные пластичные смазки, предназначенные для защиты от атмосферной коррозии металлических поверхностей.

Ключевые слова: пластичная смазка, нефтяной шлам, высококипящая фракция, термическая деструкция, полимерный загуститель, защитные свойства.

Grigorov A.B.

TECHNOLOGICAL PROCESSING OF OIL SLUDGE IN PLASTIC GREASES

A scheme for the technological processing of oil sludge by separating it using thermal degradation of a high-boiling hydrocarbon fraction boiling off at temperatures above > 360 °С and having a kinematic viscosity corresponding to industrial commodity oils I-50 and I-70 (kinematic viscosity measured at 50 °С, is in the range of 45–70 мм²/s), which can be used as a dispersion medium in the production of greases is proposed. When it is thickened with 2 % of the masses, crushed with polymer waste from low-pressure polyethylene and polypropylene, it is possible to obtain products that correspond to greases in their properties: classification according to NLGI, corresponds to 0 (semi-fluid lubricant) and 1 (soft lubricant); the upper aisle of the range of operating temperatures corresponds to 85 °С and 110 °С; the absence of corrosive effects on the metal (for example, copper); high protective properties (for steel, grade 3). Due to its properties the resulting products can be used as preservation greases designed to protect metal surfaces against atmospheric corrosion.

Keywords: grease, oil sludge, high boiling fraction, thermal degradation, polymer thickener, protective properties.

Саввова О.В.¹, д.техн.н., доцент, Шимон В.М.², д.мед.н., професор, Бабіч О.В.³, к.техн.н., перед.наук.співроб., Шерегій А.А.², к.мед.н., доцент, Шимон М.В.², к. мед.н., доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ БІОАКТИВНИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВ'ЯЗУВАННЯ З АЛЬБУМІНОМ

¹Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків, Україна

²ДВНЗ "Ужгородський національний університет" м. Ужгород, Україна

³НДУ «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

Ключові слова: біоактивні склокристалічні матеріали, структура поверхні, альбумін, гемосумісність.

Вступ. Одним з фундаментальних питань в області створення медичних виробів, що контактують з кров'ю є вивчення взаємозв'язку між фізико-хімічними та гемосумісними властивостями біоматеріалів. Відомо, що адсорбція білків є першим етапом взаємодії крові з чужорідною поверхнею. Хоча більшість досліджень властивостей гемосумісності біоматеріалів пов'язані із з'ясуванням процесів утворення адсорбційного білкового шару і зміни його властивостей з часом, до теперішнього часу дані про вплив фізико-хімічних властивостей матеріалів (хімічний склад, аморфність і кристалічність структури, гідрофільність або гідрофобність поверхні і ін.) на характер адсорбційно-десорбційних процесів білків досить суперечливі. Так, немає єдиної думки про хімічний склад, структуру і енергетичних і адсорбційних властивостях матеріалу, які б забезпечували необхідну гемосумісність виробів [1].

Вважається, що біологічні ефекти на поверхні біоматеріалу пов'язані з феноменом «адсорбції білків на твердій поверхні», що надходять з плазми крові і спрямовуються до імплантату протягом перших хвилин взаємодії «кров-тканина». На підставі теоретичної моделі конкурентної адсорбції білків плазми на поверхні матеріалу ендопротезу встановлена закономірність зміни білкового складу в наступному порядку: альбуміни, γ -глобуліни, фібриноген. Роль цих білків у розвитку запального процесу нерівнозначна. При нанесенні на біоматеріал альбуміну спостерігається зменшення приросту клітин запального ряду, а дефіцит фібриногену не дозволяв розгортати нормальну запальну реакцію, доки імплантат не вкритий даними білком. Альбумін, який представлений в найбільшій кількості в плазмі, може «екранувати» поверхню біоматеріалу, запобігаючи адгезії інших білків і клітин крові. Таким чином, саме пептиди на поверхні імплантату дозволяють ідентифікувати біоматеріал як чужорідний, який ініціює імунні реакції. Дана теорія дає пояснення, чому інертний неімуногенний матеріал запускає запальний процес.

Експерименти з модельними системами показали особливу роль в гемосумісності попередньої адсорбції альбуміну. З одного боку адсорбований сироватковий альбумін людини (САЛ) пригнічує адгезію тромбоцитів, а з іншого – перешкоджає зв'язуванню фібриногену з поверхнею. При проведенні пасивації в умовах близьких до тих, які реалізуються при контакті біоматеріалу з кров'ю (обробка поверхні плазмою крові,

підвищення концентрації білка в розчині, використання суміші білків), вдалося істотно зменшити різницю між адсорбційно-енергетичними властивостями гемосумісності гідрофільних і гідрофобних матеріалів. Отже, для підвищення гемосумісності медичних виробів доцільно проводити пасивацію поверхні сироваткою, плазмою, модельними розчинами з фізіологічними концентраціями білків, що краще, в порівнянні з широко використовуваною обробкою поверхні розчином альбуміну.

Ймовірність гемосумісності медичного виробу при короткочасному або тривалому контакті з кров'ю зростає, якщо для первинних стадій взаємодії поверхні виробу з кров'ю характерно:

- швидке формування міцно пов'язаного з поверхнею однорідного (по рівномірності покриття) мультишарів білка (випадок гідрофобних матеріалів) або утворення моношарового покриття, білки якого слабо зв'язані з поверхнею і здатні до обміну з неадсорбованими білками крові (випадок гідрофільних матеріалів);

- мінімальна активація ферментних систем крові, в тому числі і системи комплементу;

- мінімальна активація клітинних компонентів крові, включаючи агрегацію, адгезію, реакцію вивільнення і лізис клітин.

Адгезія білків на поверхні імплантованого матеріалу – стартовий етап в каскаді взаємозалежних процесів, які ініціюють один одного, та відбуваються в тканинах після поміщення імплантату. За ним слідує активація коагуляційної системи і системи комплементу, тромбоз і міграція лейкоцитів [2].

Поліморфноядерні лейкоцити першими з'являються у вогнищі запалення і відіграють основну роль в міжклітинній взаємодії. Їх міграція починається через 1–3 години після початку запальної реакції, через 6–12 годин навколо джерела роздратування формується чітко виражений лейкоцитарний вал.

У наступній фазі запальної реакції основним типом клітин стають макрофаги, що беруть на себе роль ключової регуляторної клітини – «диригента клітинного ансамблю». Вони обмежують чужорідне тіло, послідовно формують нейтрофільно макрофагальний, макрофагальний і макрофагально-фібробластичних бар'єри, які передують утворенню грануляційної тканини. Вважають, що саме макрофаги і відіграють ключову роль у взаємодії «імплантат-тканину». На поверхні макрофагів є специфічні інтегрини, які відповідальні за адгезію на поверхні імплантату, а саме – взаємодіють з адсорбованими на ній білками [2]. Наступний за акумуляцією фагоцитів процес є специфічним для даного типу запальної реакції - злиття макрофагів з утворенням гігантських клітин чужорідного тіла [12].

Отже, після імплантації синтетичного біоматеріалу розвивається типова патофізіологічна реакція, що виражається в запаленні. Особливостями її є утворення гранульом, що містять гігантські клітини чужорідного тіла – деривати макрофагів, а також формування сполучнотканинної капсули, яка відокремлює імплантат від навколишніх тканин. Характер перебігу реакції на сторонній предмет визначається реактивністю організму і особливостями матеріалу імплантату і, більшою мірою, характеристиками поверхні.

До теперішнього часу розробки вченими в області медичного матеріалознавства визначено за напрямок розробку і впровадження імплантату з «заданими біосумісними властивостями» – біоінертні, біоактивні, резорбуючі. Серед вказаних матеріалів найбільш перспективними для створення гемосумісних матеріалів є біоактивні склокристалічні матеріали з регульованими рівнем розчинності та здатністю зрощуватися з кістковою тканиною за скорочений термін [3]. Це може бути реалізовано, у тому числі, за

рахунок обробки їх поверхні в розчині альбуміну. Синтез композиційних скломатеріалів вказаного типу дозволить підвищити гемосумісність імплантату та попередити запалення тканин при імплантуванні *in vivo*, що визначає основний актуальний напрямок розробок біосумісних кальційфосфатних матеріалів для кісткового ендопротезування.

Мета роботи. Метою даної роботи є дослідження впливу структури поверхні біоактивних скломатеріалів на здатність до їх зв'язування з альбуміном.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- встановити концентрацію іонів кальцію після витримки дослідних склокристалічних матеріалів в 10 мас. % розчині альбуміну;
- дослідити перерозподілу фракцій кальцію у розчині альбуміну після контакту з дослідними зразками з урахуванням особливостей їх структури;
- визначити гемосумісність розроблених матеріалів та оцінити їх перспективність при розробці кісткових ендопротезів.

Методика проведення експерименту. Концентрацію іонів кальцію в 10 мас. % розчині альбуміну після витримки дослідних склокристалічних матеріалів впродовж 5

Таблиця 1 – Схема розподілення компонентів

Компоненти	Проба (А)	Розчин порівняння	Еталон (Б)
Дистильована вода, мл	1,00	1,02	1,00
Дослідний матеріал, мл	0,02	–	–
Калібрувальний розчин, мл		–	0,02
Гідроксид натрія, мл	0,50	0,50	0,50
Розчин реактива (мурексида), мл	2,00	2,00	2,00

діб визначали калориметричним методом [4,11]. У чисту пробірку вносили

1,0 мл дистильованої води, 0,02 мл сироватки крові і 0,5 мл розчину гідроксиду натрію з $C = 0,4$ моль / л. Розчин перемішують і через 5-10 хв і додають 2,0 мл розчину реактиву (мурексиду). Паралельно готують еталон і розчин порівняння (табл.1). Всі розчини знову перемішують і вимірюють оптичну щільність проби і еталона з розчину порівняння. Вимірювання проводять в 1 см кюветі при довжині

хвилі 540 нм не раніше, ніж через 5, але не пізніше, ніж через 15 хв після додавання розчину реактиву. Оцінка результатів. За значенням оптичної щільності проби (А) і еталона (Б) розраховують вміст вільного кальцію (х) в ммоль / л біологічного матеріалу за формулою:

$$x=2,5 \cdot A/B; \text{ ммоль/л.} \quad (1)$$

Для визначення загального вмісту кальцію до 1 см³ розчину додавали 4 см³ кислоти азотної концентрованої х.ч. і 5 см³ води дистильованої поміщали в систему мікрохвильового розкладання Ethos Easy і проводили розкладання проби під дією мікрохвильового випромінювання при температурі 185 °С. Отримані розчини кількісно перенесли в мірні колби і доводили до 15 см³ водою дистильованою. Для визначення вільного кальцію до 0,5 см³ розчинів додавали 4,5 см³ спирту етилового 96 %, для видалення утвореного осаду проби відстоювали протягом 6 діб. Визначення масової частки кальцію, а підготовлених розчинах проводили методом полум'яної атомно-абсорбційної спектроскопії на приладі Agilent AA 240FS.

Значення поверхневої енергії твердих тіл не може бути оцінено безпосередньо за значенням параметру поверхневого натягу, оскільки на їх поверхні не відбувається пе-

реміщення молекул. Крайовий кут змочування вимірювали за статичним способом та розраховували за методом сидячої краплі.

Токсичність імплантатів на основі розроблених матеріалів оцінювали в ДУ «ІПХС ім. проф. М.І. Ситенка НАМН» на підставі вивчення динаміки вмісту в сироватці крові щурів загального білка, сечовини та активності ферменту аланінової амінотрансферази (АлАТ). АлАТ визначали за кінетичним методом, вміст загального білка – біуретовим методом, вміст сечовини – ферментативним методом.

Результати експерименту та їх обговорення. Дослідні склокристалічні матеріали були синтезовані на основі кальційфосфатосилікатних стекол з хімічним складом (табл. 2), де $R_2O_3 - Al_2O_3, B_2O_3; R_2O - Li_2O, Na_2O, K_2O; RO_2 - ZrO_2, TiO_2, CeO_2, MnO_2; RO - CaO, MgO, ZnO$; модифікуючих компонентів $CoO, V_2O_5, MoO_3, La_2O_3, Cu_2O, SrO$ та наповнювача ZrO_2 , який вводили для підвищення тріщиностійкості матеріалу у кількості 5 мас. ч. на 100 мас. ч. фрити.

Стекла з маркуванням АС виготовляли за традиційною технологією, до якої входить шихтування сировинних матеріалів, варка модельних стекол у корундових тиглях при температурах 1250–1350 °С впродовж 6 годин та витримка за цих температур впродовж 0,5 год.

Склокристалічні матеріали було отримано за керамічною технологією в умовах одностадійної низькотемпературної (750–800 °С) швидкісної (15 хв) термічної обробки. Комплексні кальційфосфатосилікатні склокристалічні покриття з вмістом наповнювача діоксиду цирконію стабілізованого оксидом ітрію мали маркування АС3-1, АС3-2, АС3-3, АС3-4 та АС3-5.

Формування у структурі стекол поліфосфатів, яке визначається за співвідношенням $R_2O : P_2O_5 > 1$, дозволить сформувати сиботаксичні угруповання майбутніх кристалічних фаз [5], що поряд із забезпеченням високою реакційною здатністю скломатеріалів при $f_{Si} < 0,32$ (табл. 2), є важливим проявом їх біоактивності [6]

Як показник резорбції скла та рівня його біоактивності *in vivo* в залежності від складу було розраховано критерій *GR* (glass reaction) [7], значення якого свідчать про можливість утворення на поверхні матеріалів апатитоподібного шару ($GR = 4$) (табл. 2), що є важливим проявом їх біологічної сумісності.

Формування зв'язків біоактивного скла [8] – кістка здійснюється шляхом реакції конденсації між угрупованнями $\equiv Si - OH$ кислотного характеру і полярними групами білкових адгезивних молекул. Також можлива поява електростатичних зв'язків між молекулами білка і поверхнею скломатеріалу. Міцність цих зв'язків у порівнянні з валентними незначна, але в результаті їх чисельності, а також завдяки протіканню реакції конденсації молекула білка досить міцно закріплюється на поверхні біоактивного скла.

Таблиця 2 – Відмінності за хімічним складом дослідних стекол та структурні показники

Оксиди	Маркування				
	АС-1	АС-2	АС-3	АС-4	АС-5
	Відмінності за хімічним складом, мас. %				
SiO ₂	50,0	50,0	47,0	50,0	47,0
R ₂ O ₃	7,0	7,0	7,0	7,0	6,0
R ₂ O	11,4	12,4	12,0	12,0	10,9
RO ₂	3,0	1,0	4,0	2,5	4,0
P ₂ O ₅	9,0	9,0	10,0	9,0	10,0
RO	19,0	17,0	20,1	18,4	19,6
CaF ₂	0,5	0,5	1,0	1,0	2,4
ΣCoO, V ₂ O ₅ , MoO ₃ , La ₂ O ₃ , Cu ₂ O, SrO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>f_{Si}</i>	0,30	0,30	0,28	0,30	0,28
<i>GR</i>	3	3	4	3	4

Перераховані явища можуть призводити до локальної зміни концентрації іонізованого кальцію близько поверхні зразку.

Підтвердженням цьому є те, що після витримки в 10 % розчині альбуміну дослідних матеріалів (А/АСЗ) впродовж 5 діб загальний вміст кальцію є найвищим для розчину альбуміну після витримки матеріалу АСЗ-2 (А/АСЗ-2), найменший – для А/АСЗ-5 (рис. 1). Однак в процесі взаємодії дослідних матеріалів з розчином альбуміну при порівнянні з дистильованою водою вихід вільного (іонізованого кальцію) значно змінюється. Лише для розчинів А/АСЗ-3 та більшою мірою для А/АСЗ-5 вміст зв'язаного кальцію декілька збільшується при порівнянні з розчином альбуміну, а вільного – зменшується.

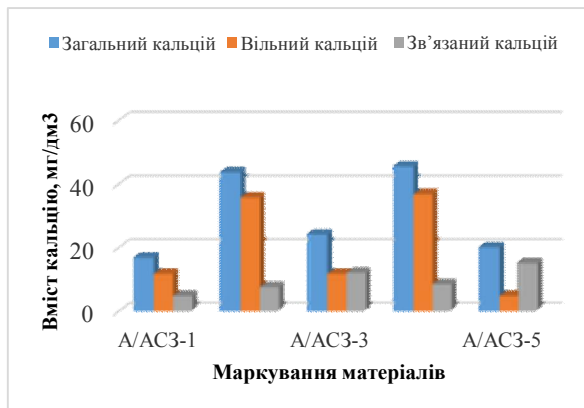


Рисунок 1 – Вміст різних форм кальцію у розчині альбуміну після витримки в ньому дослідних матеріалів

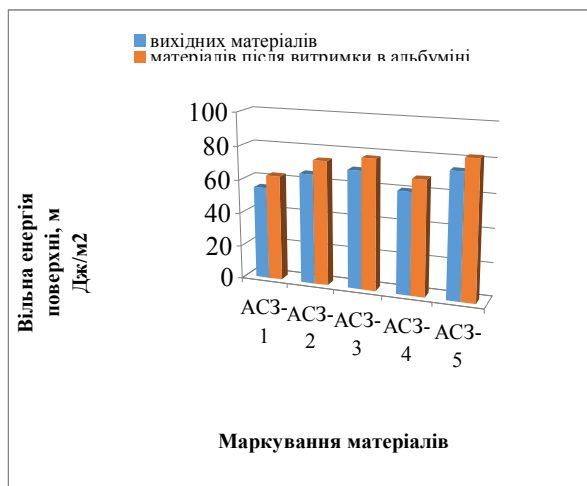


Рисунок 2 – Значення вільної енергії поверхні вихідних матеріалів та після їх витримки в альбуміні

ки з мінералами кістки [9].

Після витримки в розчині альбуміну ВЕП для дослідних матеріалів збільшується (62,9–82,3 мДж/м²) (рис. 2). Це пояснюється за рахунок інтенсифікації процесу адсорбції внаслідок утворення на поверхні дослідних матеріалів гідрофільних та гідрофобних ділянок альбуміну.

Адсорбція альбуміну тісно пов'язані з процесом перерозподілу фракцій кальцію у результаті контакту біоактивних матеріалів з сироватою крові [10]. Процес

з термодинамічної точки зору для протікання процесів остеointegraції поверхня матеріалу імплантату повинна забезпечувати мимовільну адсорбцію протеїнів, яка суттєво залежить від вільної енергії поверхні (ВЕП). Значення ВЕП (55,37÷74,59 мДж/м²) (рис. 2) для вихідних дослідних матеріалів вказують на можливість міжмолекулярній взаємодії на межі розподілу фаза та утворення зародків нової фази.

По відношенню до дослідних гідрофільних скломатеріалів, проявляє в'язучу здатність, вміщує ліпофільні та гідрофільні зв'язки. Поряд з цим, ГАП, який має виражені остеокондуктивні властивості та присутній у структурі дослідних матеріалів забезпечує адгезію протеїнів і клітин кісткової тканини, активно включається в іонний обмін і метаболізм кісткового матриксу, підтримує іонні та ковалентні зв'яз-

зв'язування кальцію з альбуміном для дослідних матеріалів визначається характеристиками їх поверхні (ВЕР), характеру їх резорбції (GR, вміст зв'язаного кальцію у розчині), особливостями їх структури (f_{Si} , наявність поверхневої кристалізації ГАП).

У результаті досліджень токсичності імплантатів за динамікою вмісту в сироватці крові загального білка, сечовини та активності ферменту АлАТ встановлено вміст загального білка на 7-му добу після імплантації ($79,13 \pm 1,71$) г/л, на 14-ту – ($70,15 \pm 2,23$) г/л, 30-ту – ($73,15 \pm 0,45$) г/л, 90-ту – ($71,57 \pm 3,00$) г/л.

Вміст сечовини на 7-му добу становив ($5,08 \pm 0,34$) ммоль/л, на 14-ту – ($3,93 \pm 0,25$) ммоль/л, 30-ту – ($4,25 \pm 0,55$) ммоль/л, 90-ту – ($4,94 \pm 0,43$) ммоль/л. Активність АлАТ дорівнювала ($44,25 \pm 3,16$) U/L, ($48,00 \pm 4,91$) U/L, ($70,00 \pm 14,00$) U/L, ($41,56 \pm 5,81$) U/L відповідно. Статистично значущої різниці між досліджуваними показниками на термінах експерименту не виявлено, що свідчить про відсутність впливу імплантатів АСЗ-5 на функціональний стан печінки та нирок експериментальних тварин. Це свідчить про гемосумісність дослідних матеріалів, у тому числі, за рахунок попередньої адсорбції альбуміну, та їх здатність до ефективного функціонування в живому організмі після його імплантування.

Висновки. Встановлено, що локальне перерозподілення іонів кальцію та їх зв'язування з альбуміном на поверхні розробленого матеріалу АСЗ-5 визначаються характеристиками їх поверхні (ВЕР=74,59), характером їх резорбції ($GR=4$, вміст зв'язаного кальцію у розчині) $15,3 \text{ мг/дм}^3$, особливостями їх структури ($f_{Si} = 0,28$), наявність поверхневої кристалізації ГАП. Забезпечення гемосумісності розробленого склокристалічного матеріалу, що пов'язано з утворенням адсорбційного білкового шару на його поверхні, є важливим фактором їх надійної експлуатації *in vivo*.

Література

1. Шкарупа Д.Д., Шпилень Е.С., Кубин Н.Д. Основы биосовместимости синтетических материалов // Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова. – 2013. – Т. XX, № 2. – С. 5–7.
2. Севастьянов В.И. Биосовместимость. М.: ИЦ ВНИИГС, 1999. – 368 с.
3. Хенч Л., Джонс Д. Биоматериалы, искусственные органы и инжиниринг тканей М.: Техносфера, 2007. – 301 с.
4. Savvova O., Shadrina G., Babich O., Fesenko O. Investigation of surface free energy of the glass-ceramic coatings for medical purposes on titanium// Chemistry and Chemical Technology. – 2015. – Vol. 9, No 3. – P. 349–354.
5. Каназава Т.К. Неорганические фосфатные материалы / К.: Наукова думка, 1998. – 298 с.
6. Белецкий Б.И., Свентская Н.В. Кремний в живых организмах и биокомпозиционных материалах нового поколения // Стекло и керамика. – 2009. – №3. – С. 26–30.
7. Maria Brink, Kaj Karlsson, Antti Yli-Urpo Pat. USA 006054400A Bioactive glasses and their use. 2000.
8. Саввова О.В., Бабіч О.В., Фесенко О.І., Воронов Г.К. Сучасні технології біосумісних матеріалів для кісткового ендопротезування.– Харків: НТУ «ХПІ», 2017.– 280 с.
9. Абрамов Д.В., Иорданишвили А.К. Стоматологические конструкционные материалы. Санкт-Петербург: МАНЭБ-Нордмедиздат, 2012. – 250 с.
10. Savvova O.V., Bragina L.L., Shadrina G.N., Babich E.V., Fesenko A.I. Surface Properties of Biocompatible Calcium-Silicon-Phosphate Glass Ceramic Materials and Coatings // Glass and Ceramics. – 2017. – No. 74(1–2). – pp. 29–33.

11. Savvova O., Babich O., Fesenko O., Bragina L., Voronov G. Biocompatible glass-ceramic coatings/ Calcium-phosphate-silicate coatings on titanium for dental implants. – Riga : SIA Omni Scriptum Publishing. – 2018. – 67 p.

12. Kiroshka V.V., Savvova O.V., Bozhkova Y.O., Tamarina I.V., Fesenko A.I. Spreading and proliferation of cultured rat bone marrow stromal cells on the surface of bioactive glass ceramics. – Biopolymers and Cell. – 2017. – No. 33(1). – pp. 48–57.

Bibliography (transliterated)

1. Shkarupa D.D., Shpylenia E.S., Kubyn N.D. Osnovi byosovmestymosty syntetycheskykh materyalov // Uchenie zapysky SPbHMu ym. akad. Y.P. Pavlova. – 2013. – T. XX, № 2. – P. 5–7.

2. Sevastianov V.Y. Byosovmestymost. M.: YTs VNYYHS, 1999. – 368 p.

3. Khench L., Dzhons D. Byomateryali, yskusstvennie orhani y ynzhyrynynh tkanei M.: Tekhnosfera, 2007. – 301 p.

4. Savvova O., Shadrina G., Babich O., Fesenko O. Investigation of surface free energy of the glass-ceramic coatings for medical purposes on titanium// Chemistry and Chemical Technology. – 2015. – Vol. 9, No 3. – P. 349–354.

5. Kanazava T.K. Neorhanycheskye fosfatnie materyali / K.: Naukova dumka, 1998. – 298 p.

6. Beletskiy B.Y., Svetskaia N.V. Kremnyi v zhyvikh orhanyzmakh y byokompozytsyonnykh materyalakh novoho pokoleniya // Steklo y keramyka. – 2009. – №3. – P. 26–30.

7. Maria Brink, Kaj Karlsson, Antti Yli-Urpo Pat. USA 006054400A Bioactive glasses and their use. 2000.

8. Savvova O.V., Babich O.V., Fesenko O.I., Voronov H.K. Suchasni tekhnolohii biosumisnykh materialiv dlia kistkovoho endoprotezuвання. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – 280 p.

9. Abramov D.V., Yordanyshvily A.K. Stomatolohycheskye konstruktsyonnie materyali. Sankt-Peterburh: MANЭB-Nordmedyzdat, 2012. – 250 p.

10. Savvova O.V., Bragina L.L., Shadrina G.N., Babich E.V., Fesenko A.I. Surface Properties of Biocompatible Calcium-Silicon-Phosphate Glass Ceramic Materials and Coatings // Glass and Ceramics. – 2017. – No. 74(1–2). – pp. 29–33.

11. Savvova O., Babich O., Fesenko O., Bragina L., Voronov G. Biocompatible glass-ceramic coatings/ Calcium-phosphate-silicate coatings on titanium for dental implants. – Riga : SIA Omni Scriptum Publishing. – 2018. – 67 p.

12. Kiroshka V.V., Savvova O.V., Bozhkova Y.O., Tamarina I.V., Fesenko A.I. Spreading and proliferation of cultured rat bone marrow stromal cells on the surface of bioactive glass ceramics. – Biopolymers and Cell. – 2017. – No. 33(1). – pp. 48–57.

УДК 666.266.6.01

Саввова О.В., Шимон В.М., Бабіч О.В., Шерегій А.А., Шимон М.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ БІОАКТИВНИХ СКЛОМАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВ'ЯЗУВАННЯ З АЛЬБУМІНОМ

Проаналізовано основні етапи взаємодії медичного виробу як імплантату при контакті з кров'ю та визначено аспекти гемосумісності матеріалів при контакті з альбуміном. Розроблено склокристалічні матеріали за керамічною технологією в умовах од-

ностадійної швидкісної термічної обробки та розраховано їх структурні показники. Встановлено перерозподіл вільного та зв'язаного кальцію після витримки біоактивних склокристалічних матеріалів в розчині альбуміну з урахуванням особливостей показників структури їх поверхні. Визначено гемосумісність розроблених кальційсилікофосфатних матеріалів та проведена їх оцінка перспективності при розробці кісткових ендопротезів.

Ключові слова: біоактивні склокристалічні матеріали, структура поверхні, альбумін, гемосумісність.

Саввова О.В., Шимон В.М., Бабич Е.В., Шерегий А.А., Шимон М.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ БИОАКТИВНЫХ СТЕКЛОМАТЕРИАЛОВ НА ИХ СПОСОБНОСТЬ К СВЯЗЫВАНИЮ С АЛЬБУМИНОМ

Проанализированы основные этапы взаимодействия медицинских изделий как имплантата при контакте с кровью и определены аспекты гемосумисности материалов при контакте с альбумином. Разработаны стеклокристаллические материалы по керамической технологии в условиях одностадийной скоростной термической обработки и рассчитаны их структурные показатели. Установлено перераспределение свободного и связанного кальция после выдержки биоактивных стеклокристаллические материалы в растворе альбумина с учетом особенностей показателей структуры их поверхности. Определена гемосовместимость разработанных кальцийсилікофосфатных материалов и проведена оценка их перспективности при разработке костных эндопротезов.

Ключевые слова: биоактивные стеклокристаллические материалы, структура поверхности, альбумин, гемосовместимость.

Savvova O.V., Shimon V.M., Babich O.V., Sheregiy A.A., Shimon M.V.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAVY METAL IONS IN THE COMPOSITION OF GLASS-COMPOSITE COATINGS ON PATHOGENIC MICROORGANISMS

The main stages of the interaction of medical devices as an implant in contact with blood are analyzed and the hemosumicity aspects of materials in contact with albumin are determined. Glass-crystalline materials based on ceramic technology were developed under the conditions of one-stage high-speed heat treatment and their structural parameters were calculated. The redistribution of free and bound calcium after exposure to bioactive glassy-crystalline materials in an albumin solution is established taking into account the characteristics of their surface structure. The hemocompatibility of the developed calcium silicophosphate materials was determined and their potential was evaluated in the development of bone endoprotheses.

Key words: bioactive glass-crystalline materials, surface structure, albumin, hemocompatibility.

Перевалов Л.І., к.техн.н., проф., Півень О.М., к.техн.н., проф.,
Тесленко С.О., аспірант

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НАСІННЯ ВИСОКООЛЕЇНОВОГО СОНЯШНИКУ ГІБРИДА УКРАЇНСЬКИЙ F1 НА ОБРУШУВАННЯ ЦЬОГО НАСІННЯ В ЗАМОРОЖЕНОМУ СТАНІ

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

Ключові слова: насіння соняшнику, гібрид Український F1, фракційний склад, обрушування в замороженому стані, вплив вологи, параметри якісного обрушування.

Вступ. Сучасна технологія переробки насіння соняшнику дозволяє використовувати, за самими оптимістичними підрахунками 68...70 % їх харчового потенціалу у вигляді олії. 30...32 % харчового потенціалу, що залишився, містить вуглеводи й фізіологічно цінні протеїни. Останні, що включають 20 амінокислот, у тому числі всі незамінні, залишаються в шроті, який через наявність у ньому до 15...20 % лушпиння не є харчовим продуктом і використовується в якості білкової добавки до кормів сільськогосподарських тварин. У цьому зв'язку, створення сучасної ресурсозберігаючої технології переробки соняшнику з одночасним одержанням високоякісної олії і харчового білкового продукту, становить безсумнівний інтерес [7].

Аналіз останніх досліджень і літератури. Першою й головною ланкою такої технології може бути ефективний процес одержання безлушпинного ядра, який заснований на процесі якісного обрушування насіння. Важлива роль при цьому належить стадії підготовки насіння до обрушування, в результаті якої оболонка насіння повинна стати більш крихкою, а ядро залишитися міцним (пластичним). Найбільш удаюю спробою його одержання є виробнича лінія, розроблена професором НТУ «ХПІ» Н.П. Іхно, на якій вдалося досягти якісного обрушування (до ступеня обрушування 95...100 % за один прохід через насіннерушку 2-Іхно) вузьких фракцій великого за розміром насіння (по товщині від 3,6 мм й вище) [1, 9]. Більш дрібні фракції, вміст яких у високоолійного насіння досягає 30...50 %, обрушуються значно гірше. Вихід олійного пилу при цьому становить 9...15 %.

У даній роботі для досягнення якісного обрушування насіння, як великих, так і дрібних розмірів, використано виявлений нами ефект зниження сили руйнування оболонки насіння соняшника при обрушуванні їх у замороженому стані [2, 10].

Мета роботи полягає у визначенні раціональних умов підготовки насіння по вологості, при якій може бути забезпечено їхнє якісне обрушування й одержання на цій основі безлушпинного ядра за один прохід через насіннерушку. Для виконання поставленого завдання досліджений вплив фракційного складу й вологості насіння високоолійного соняшника гібриду Український F1 на параметри процесу їх обрушування в замороженому стані, а для порівняння, при температурі 20 °С і постійних обертах ротору насіннерушки.

Експериментальна частина. Попередніми дослідженнями методом калібрування на щілинних ситах було визначено фракційний склад вихідного насіння, що представлений у вигляді діаграми на рис. 1.

Для подальших досліджень було взято чотири зразки насіння, перший з яких являє собою вихідну суміш (широка фракція 2,2...5,0 мм). А наступні три – вузькі фракції (2,4...2,6; 3,2...3,4 і 4,2...4,5 мм), що обрані в якості характерних представників дрібних, середніх і великих частин насіння, відповідно. За діаграмою було визначено вміст кожної фракції у вихідній суміші.

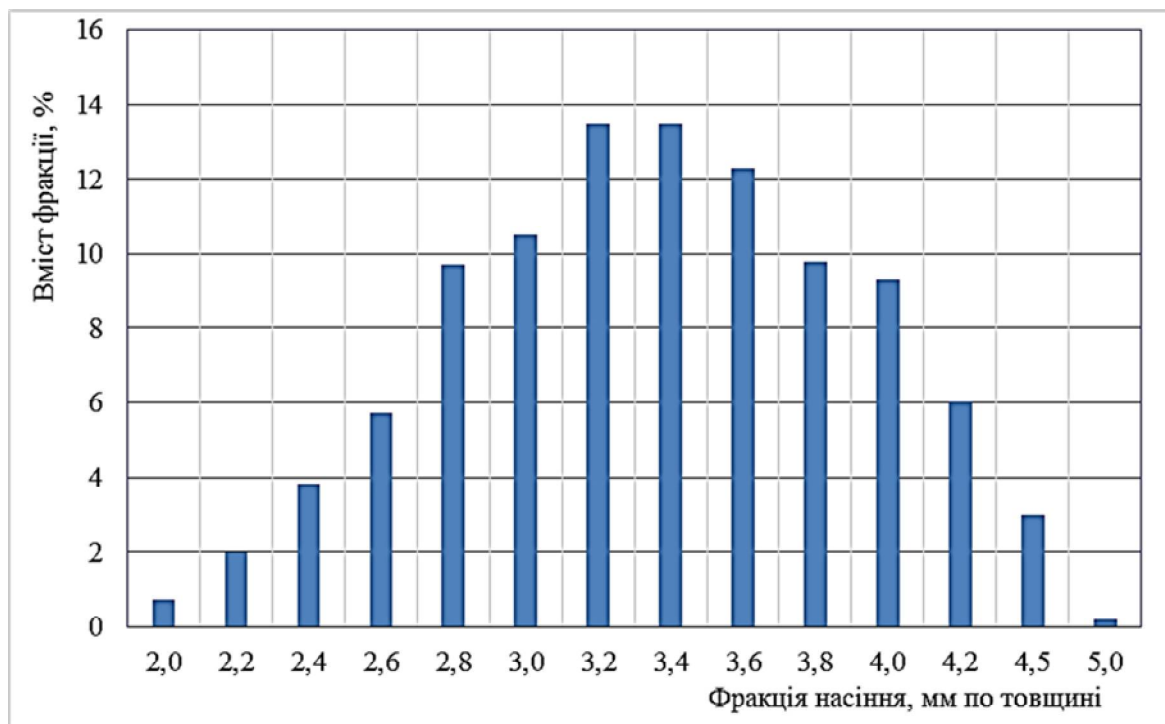


Рисунок 1 – Діаграма фракційної сполуки насіння гібрида соняшнику Український F1

Визначені також лущинність, вміст ядра і вологість обраних зразків [12]. Результати попередніх досліджень представлені в табл. 1.

Після попередніх досліджень насіння кожної фракції були кондиційовані за вологістю, а потім обрушені на відцентровій насіннерушці 2-Іхно, що дозволяє здійснити обрушування шляхом однократного орієнтованого удару об деку кожної насінини окремо [3, 11]. Обрушування кожної фракції насіння соняшнику здійснювали при постійних обертах насіннерушки ($23,3 \text{ c}^{-1}$) в інтервалі вологості від 5,6 до 0,5 % і двох температурах обрушування мінус $30 \text{ }^\circ\text{C}$ і плюс $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Підсушування проводили на лабораторній сушарці киплячого шару при температурі теплоносія (повітря) до $80 \text{ }^\circ\text{C}$, при цьому температура насіння не перевищувала $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Охолодження насіння до від’ємних температур здійснювали в парах над киплячим рідким азотом у герметично закритому поліетиленовому контейнері із вбудованим датчиком температури. З отриманої рушанки виділяли ціле й дроблене ядро, січку, а також олійний пил.

На основі даних про вміст рушанки й характеристику фракцій, що наведені у табл.1, були обчислені основні параметри, що характеризують процес обрушування насіння кожної фракції.

Таблиця 1 – Характеристики фракцій насіння соняшника, що досліджувалися

Фракція насіння, мм (по товщині)	Лушпинність, % мас	Вміст ядра (С _я), % мас	Вихідна вологість, % мас.	Маса 1000 штук, г	Вміст фракції у вихідному насінні, % мас.
2,2...5,0 вихідне насіння	31,5	67,9	5,6	51,1	100
2,4...2,6 дрібні	28,0	71,9	5,6	36,9	9,2
3,2...3,4 середні	29,2	70,1	5,6	77,6	26,4
4,2...4,5 великі	30,6	68,9	5,6	77,1	9,0

Ступінь обрушування насіння (Ст. обр.), і ступінь вилучення з них ядрової фракції при обрушуванні (Ст. вил. я.) є основними показниками якості обрушування. Значення цих показників на рівні 95...100 % відповідають якісному обрушуванню, при якому в складі ядрової фракції (суми цілого й дробленого ядра, а також січки) залишається до одного відсотка лушпиння. Безлушпинне ядро такої якості придатне для одержання високоякісної олії і первинних харчових білкових продуктів (макухи й шроту). Коефіцієнт збереження цілого ядра (Кзя) визначається часткою цілого ядра від загального змісту ядрової фракції в рушанці. Значення Кзя рівне 0,9 і вище при якісному обрушуванні насіння свідчить про можливість ефективного використання отриманого безлушпинного ядра в хлібобулочній і кондитерській промисловості. Усі ці дані, а також вміст олійного пилу (О_п,%) від маси обрушеного насіння наведені в табл. 2.

Обговорення результатів дослідження. З таблиці 2 видно, що ступінь обрушування, як вихідного насіння, так і їх вузьких фракцій, при температурах проведення дослідів, зростає зі зниженням вологості. Однак, для кожного з досліджених зразків насіння рівень якісного обрушування досягається при різних умовах.

Для вихідного насіння (фракція 2,2...5,0 мм) цей рівень отриманий при температурі обрушування мінус 30 °С і вологості 1,0 ...1,5 %; для фракції насіння (3,2–3,4 мм) – при температурі обрушування мінус 30 °С и вологості 0,5 – 3,0 %. А для фракції насіння (4,2–4,5 мм) – при температурах як мінус 30, так і при плюс 20 °С у інтервалах вологості від 0,5 до 5,6 % і від 0,5 до 3,0 %, відповідно. Аналогічні результати було одержано М.П. Іхно, при обрушуванні при 20 °С фракції насіння соняшника сорту Ласун, що перевищує 3,6 мм по товщині [1].

Уперше показано, що різниця в ступені обрушування фракції насіння (4,2...4,5 мм) при мінус 30 °С и плюс 20 °С зменшується при зниженні їх вологості до 1,0 % і практично зникає при мінімальному вмісті вологи 0,5 %. Насіння вузької фракції (2,4...2,6 мм) якісно обрушити при обраних обертах ротора насіннерушки (23,3 с⁻¹) не вдається.

Ступінь отримання ядрової фракції (Ст. вил. я), як і ступінь обрушування насіння (Ст. обр.), характеризують якість обрушування. Характеристика залежностей цих параметрів від фракційної складу насіння, їх вологості й температури обрушування аналогічні. Максимальні значення (Ст. вил. я) на рівні 96...100 % отримані в інтервалі вологості насіння 3,0...0,5 % при температурі обрушування мінус 30 °С.

Таблиця 2 – Параметри процесу обрушування досліджених фракцій насіння соняшника залежно від вологості при температурах обрушування +20 °С і -30 °С) і обертах ротора насіннерушки (23,3 с⁻¹)

Фракція 2,2...5,0 мм										
Вологість, %	5,6		3,0		1,5		1,0		0,5	
Температура, °С	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30
К _{зя}	0,77	0,69	0,77	0,89	0,71	0,94	0,76	0,94	0,70	0,94
Ст.обр., %	59,88	78,25	79,67	90,46	83,66	93,35	87,13	96,06	85,87	93,66
Ст.вил.я, %	54,3	78,0	72,3	92,0	73,6	99,0	78,4	100,0	98,6	98,4
О _п , %	5,7	3,8	8,7	3,5	11,1	1,7	10,4	2,7	11,7	2,7
Фракція 2,4...2,6 мм										
Вологість, %	5,6		3,0		1,5		1,0		0,5	
Температура, °С	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30
К _{зя}	0,54	0,89	0,32	0,87	0,64	0,92	0,63	0,94	0,58	0,89
Ст.обр., %	34,62	62,12	56,44	75,39	65,44	85,18	68,17	83,92	62,09	71,94
Ст.вил.я, %	24,9	61,8	46,4	73,6	53,0	85,6	55,7	87,0	46,9	72,0
О _п , %	7,6	3,5	9,6	4,9	10,8	2,8	10,8	3,4	11,9	3,9
Фракція 3,2...3,4 мм										
Вологість, %	5,6		3,0		1,5		1,0		0,5	
Температу-	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30
К _{зя}	0,71	0,79	0,76	0,95	0,75	0,95	0,75	0,91	0,76	0,95
Ст.обр., %	61,38	78,31	75,6	96,01	86,33	97,17	86,39	96,73	93,37	98,28
Ст.вил.я, %	49,1	65,5	67,2	97,0	76,3	99,0	75,8	96,9	83,5	100,0
О _п , %	10,5	4,7	8,9	2,8	11,8	3,4	11,4	3,3	11,0	1,9
Фракція 4,2...4,5мм										
Вологість, %	5,6		3,0		1,5		1,0		0,5	
Температу-	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30	20	-30
К _{зя}	0,42	0,92	0,81	0,89	0,75	0,92	0,76	0,88	0,91	0,74
Ст.обр., %	93,31	97,42	96,79	98,8	95,78	99,31	96,57	100,00	99,05	98,94
Ст.вил.я, %	84,5	98,5	87,8	96,4	85,3	98,0	86,8	98,0	86,8	97,0
О _п , %	7,0	3,0	8,4	2,9	9,4	2,0	8,9	1,8	11,8	3,2

Коефіцієнт збереження ядра (К_{зя}) маловивчений параметр процесу обрушування соняшника. У таблиці 2 наведені дані, що свідчать про нові можливості керування цим параметром. Показано, що ні фракційний склад, ні вологість насіння при температурі їх обрушування плюс 20 °С не впливають на величину К_{зя}. Його величина з невеликими коливаннями залишається однаковою в інтервалі 0,72...0,75 у всьому діапазоні досліджених факторів, за винятком невеликого зниження К_{зя} до 0,63...0,69 при обрушуванні насіння дрібних розмірів (2,2...2,4 мм). Новим фактором, що ефективно впливають на К_{зя}, є від’ємна температура насіння при обрушуванні. Причому, вплив мінусової температури насіння, що обрушують, на К_{зя} проявляється тільки в області їх низьких значень вологості (3,0...0,5 %).

Вихід олійного пилу (О_п %) при обрушуванні насіння соняшника це показник процесу, яким дуже важко управляти, якщо при цьому ставиться завдання збереження високого ступеня обрушування. З літератури і практичної роботи підприємств добре відомі фактори, що приводять при обрушуванні насіння соняшни-

ку до підвищення виходу олійного пилу. До них, зокрема, відносяться: а) зниження вологості насіння нижче 6...7 % [4]; б) орієнтація насінини при ударі об деку насіннерушки (при ударі тупим кінцем, пил утворюється менше ніж при ударі гострим) [5]. Найбільший вихід олійного пилу при обрушуванні насіння на бичевій насіннерушці.

На сучасному промисловому устаткуванні для обрушування соняшникового насіння, вихід олійного пилу становить 15...20 %. У даному дослідженні обрушування проводили на одній із кращих відцентрових насіннерушок (2-Іхно), конструкція якої дозволяє обрушувати насіння соняшника по одній насініні, запобігаючи тим самим повторне дроблення лушпиння і ядра в зоні удару. Однак, і в цьому випадку, вихід олійного пилу становить від 9 до 15 %. За даними таблиці 2 видно, що зазначена раніше закономірність підвищення виходу олійного пилу при зниженні вологості насіння [6] зберігається й при температурі обрушування плюс 20 °С. Так, зниження вологості вихідної суміші насіння і їх вузьких фракцій від 5,6 до 0,5 % призводить до збільшення виходу олійного пилу від 5,7 до 11,8 %. Якщо ж обрушування всіх фракцій насіння проводити при мінус 30° С, то в інтервалі вологості 5,6...3,0 % вихід пилу знижується в 1,5...2,5 рази (до 3,5...4,8 %), а в інтервалі вологості 3,0...0,5 % олійного пилу утворюється в 3,1...5,8 раз менше, чим при тій же вологості, але при температурі плюс 20 °С.

Висновки. Уперше показано, що якісне обрушування насіння гібрида високоолеїнового соняшника Український F1 може бути здійснено як на вихідній суміші насіння, так і на їх вузьких фракціях при температурі обрушування мінус 30 °С, вологості 1...3 % і обертах ротора відцентрової насіннерушки 23,3 с⁻¹.

Уперше виявлено, що мінусова температура обрушування насіння в області його низької вологості і вказаних обертах ротора насіннерушки є новим технологічним фактором, що виявляє комплексний вплив на якісні показники процесу. Зниження температури обрушування вихідного насіння від плюс 20 °С до мінус 30 °С, за інших рівних умов, дозволяє збільшити ступінь обрушування на 10,8...14,7 %; підвищити ступінь вилучення ядрової фракції на 19...25 %; підняти коефіцієнт збереження цілого ядра на 16...20 %, а вихід олійного пилу зменшити в 2,5...5,0 разів.

Досягнуті результати дозволяють рекомендувати даний метод обрушування як основу для створення безвідхідної технології одержання безлушпинного ядра, придатного для одночасного вилучення з нього високоякісного олії й харчового білкового продукту, а також для одержання цілого ядра для застосування в хлібобулочній і кондитерській промисловості.

Література

1. Пат. 27009 Україна, МПК AL 1/36, C11B 1/04. Спосіб одержання ядра соняшникового насіння / Іхно М.П.; заявник та патентовласник Іхно Микола Петрович. – № u95114827; заявл. 09.11.1995; опубл. 28.02.2000; Бюл. № 1.
2. Taradaichenko M. Optimal parameters of sunflower seeds dehulling process with freezing / Mariia Taradaichenko, Leonid Perevalov, Sergiy Teslenko, Irina Parhomova // Inzynieria i aparatura chemiczna. – Poland: Lodz University of Technology, 2013. – № 4. – P. 374–375.
3. Іхно М.П. Науково-практичні основи отримання та використання харчового безлушпинного ядра соняшника: дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук:

спец. 05.18.06 «Технологія жирів, ефірних масел і парфумерно-косметичних продуктів» / М.П. Іхно. – Харків. – 2002.

4. Фют А.К. Совершенствование технологии и оборудования подготовительных процессов переработки семян подсолнечника / А.К. Фют, В.В. Ключкин // М.: АгроНИИТЭИПП, 1990. – Серия 20. – Вып. 5.– 32 с.

5. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел / В.В. Белобородов.– М.: Пищевая промышленность, 1966. – 478 с.

6. Щербаков В.Г. Технология получения растительных масел: Учебник. 3-е изд., перераб. и доп./ В.Г.Щербаков. М.: Колос, 1992,– 207с.

7. Іхно Н.П. Пищевое безлузговое ядро подсолнечника – источник белков в рационе питания населения Украины / Н.П. Іхно // Хранение и переработка зерна. – 2001.– Т. 22. – №4. – С. 35–38.

8. Купченко А.В. Огляд і класифікація способів підготовки насіння соняшнику до обрушування / А.В. Купченко, Т.І. Мелехова // Хранение и переработка зерна. – 2014.– №10 (187). – С. 41–43.

9. Іхно Н.П. Теория и практика получения низколузгового ядра подсолнечника Н.П. Іхно // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 3.– С. 42–45.

10. Пат. 114205 Україна, МПК (2017.01), С11В 1/02 (2006.01), В02В 3/00. Спосіб обрушування соняшникового насіння / Перевалов Л.І., Попсуйшак А.В., Гладкий Ф.Ф., Півень О.М., Гірман В.В., Тесленко С.О., Калішевська Н.В., Задорожний В.К.; заявник та патентовласник Перевалов Леонид Іванович. – № а201500862; заявл. 03.02.2015; опубл. 10.05.2017; Бюл. № 9.

11. Пат. 17430 Україна, МПК В02В 3/02, В02В 3/00. Насіннерушка-2 Іхно / Іхно М.П.; заявник та патентовласник Харківський державний політехнічний університет. – № 95042099; заявл. 27.04.99; опубл. 16.10.2000; Бюл. № 5.

12. Лабораторный практикум по технологии отрасли (производство растительных масел) / Е.П. Корнена, Л.А. Мхитарьянц, Е.В. Мартовшук; Под ред. Е.П. Корненой – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.

Bibliography (transliterated)

1. Pat. 27009 Ukraine, MPK AL 1/36,S11V 1/04. Sposib oderzhannia yadra soniashnykovoho nasinnia / Ikhno M.P.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Ikhno Mykola Petrovych. – № u95114827; zaiavl. 09.11.1995; opubl. 28.02.2000; Biul. № 1.

2. Taradaichenko M. Optimal parameters of sunflower seeds dehulling process with freezing / Mariia Taradaichenko, Leonid Perevalov, Sergiy Teslenko, Irina Parhomova // Inzynieria i aparatura chemiczna. – Poland: Lodz University of Technology, 2013. – no 4. – P. 374–375.

3. Іхно М.П. Науково-практичні основи отримання та використання харчового безлузпного ядра соняшника: дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.18.06 «Технологія жирів, ефірних масел і парфумерно-косметичних продуктів» / М.П. Іхно. – Харків. – 2002.

4. Fyut A.K. Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniya podgotovitelnykh protsessov pererabotki semyan podsolnechnika / A.K. Fyut, V.V. Klyuchkin // М.: АгроНИИТЭИПП, 1990. – Серия 20. – Вып. 5.– 32 p.

5. Beloborodov V.V.Osnovnyie protsessy i proizvodstva rastitelnykh masel / V.V. Beloborodov.– М.: Pischevaya promyshlennost, 1966. – 478 p.

6. Scherbakov V.G. Tehnologiya polucheniya rastitelnyih masel: Uchebnik. 3-e izd., pererab. i dop./ V.G.Scherbakov. M.: Kolos, 1992,– 207 p.
7. Ihno N.P. Pischevoe bezluzgovoe yadro podsolnechnika – istochnik belkov v ratsione pitaniya naseleniya Ukrainyi / N.P. Ihno // Hranenie i pererabotka zerna. – 2001.– T. 22. – no 4. – P. 35–38.
8. Kupchenko A.V. Ohliad i klasyfikatsiia sposobiv pidhotovky nasinnia soniashnyku do obrushuvannia / A.V. Kupchenko, T.I. Melekhova // Khraneniye u pererabotka zerna. – 2014.– №10 (187). – P. 41–43.
9. Ihno N.P. Teoriya i praktika polucheniya nizkoluzgovogo yadra podsolnechnika N.P. Ihno // Hranenie i pererabotka selhozsyriya. – 2000. – no 3.– P. 42–45.
10. Pat. 114205 Ukraina, MPK (2017.01), S11V 1/02 (2006.01), V02V 3/00. Sposib obrushuvannia soniashnykovoho nasinnia / Perevalov L.I., Popsuishapka A.V., Hladkyi F.F., Piven O.M., Hirman V.V., Teslenko S.O., Kalishevskaya N.V., Zadorozhnyi V.K.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Perevalov Leonyd Ivanovych. – № a201500862; zaiavl. 03.02.2015; opubl. 10.05.2017; Biul. № 9.
11. Pat. 17430 Ukraina, MPK B02B 3/02, B02B 3/00. Nasinnierushka-2 Ikhno / Ikhno M.P.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Kharkivskiy derzhavnyi politekhnichnyi universytet. – № 95042099; zaiavl. 27.04.99; opubl. 16.10.2000; Biul. № 5.
12. Laboratorniy praktikum po tehnologii otrasli (proizvodstvo rastitelnyih masel) / E.P. Kornena, L.A. Mhitaryants, E.V. Martovschuk; Pod red. E.P. Kornenoy – SPb.: GIORD, 2013. – 224 p.

УДК 582.998.2:664.31

ПЕРЕВАЛОВ Л.І., к.техн.н., професор, ПІВЕНЬ О.М., к.техн.н., професор,
ТЕСЛЕНКО С.О., аспірант

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НАСІННЯ ВИСОКООЛЕЇНОВОГО СОНЯШНИКА ГІБРИДУ УКРАЇНСЬКИЙ F1 НА ЙОГО ОБРУШУВАННЯ У ЗАМОРОЖЕНОМУ СТАНІ

Предметом дослідження є процес обрушування насіння соняшнику з метою одержання безлушпинного ядра. Вивчено вплив фракційного складу, вмісту вологи за мінусової температури на технологічні характеристики процесу обрушування високоолеїнового насіння соняшнику гібриду Український F1. Визначено раціональні умови підготовки та параметри якісного обрушування насіння різних фракцій за умови постійної швидкості обертання ротору насіннерушки. Вперше досліджено сумісний вплив мінусової температури та низької вологості як комплексного фактору управління процесом обрушування. Зниження температури насіння під час обрушування від плюс 20 °С до мінус 30 °С (за умови інших однакових умов), дозволяє за один прохід через насіннерушку збільшити ступінь обрушування на 10,8...14,7 %; підвищити ступінь вилучення ядрової фракції на 19...25 %, а коефіцієнт збереження цілого ядра – на 16...20 %, вихід олійного пилу зменшити в 2,5...5,0 разів.

Ключові слова: насіння соняшнику, гібрид Український F1, фракційний склад, обрушування в замороженому стані, вплив вологи, параметри якісного обрушування.

Перевалов Л.И., к.техн.н, профессор, Пивень Е.Н., к.техн.н, профессор,
Тесленко С.А., аспирант

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ СЕМЯН ВИСОКООЛЕИНОВОГО ПОДСОЛНЕЧНИКА ГИБРИДА УКРАИНСКИЙ F1 НА ЕГО ОБРУШИВАНИЕ В ЗАМОРОЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Предметом исследования является процесс обрушивания семян подсолнечника с целью получения безлузгового ядра. Изучено влияние фракционного состава, содержания влаги при минусовой температуре на технологические характеристики процесса обрушивания високоолеиновых семян подсолнечника гибрида Украинский F1. Определены рациональные условия подготовки и параметры качественного обрушивания семян различных фракций при постоянной скорости вращения ротора семенорушки. Впервые исследовано совместное влияние минусовой температуры и низкой влажности как комплексного фактора управления процессом обрушивания. Снижение температуры семян при обрушивании от плюс 20 °С до минус 30 °С (при прочих равных условиях), позволяет за один проход через семенорушку увеличить степень обрушивания на 10,8–14,7 %; повысить степень извлечения ядровой фракции на 19–25 %, а коэффициент сохранности целого ядра – на 16–20 %, выход масляной пыли уменьшить в 2,5–5,0 раз.

Ключевые слова: семена подсолнечника, гибрид Украинский F1, фракционный состав, обрушивание в замороженном состоянии, воздействие влаги, параметры качественного обрушивания.

Perevalov L.I., Piven O.M., Teslenko S.O.

EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON DEHULLING OF FROZEN HIGH-OLEIC SUNFLOWER SEEDS OF HYBRID «UKRAINSKYI-F1»

The subject of research is the process of dehulling of sunflower seeds to produce dehulled kernels. The authors studied the fractional composition, moisture content and subzero temperatures effects on dehulling of sunflower seeds of Ukrainian FI hybrid. The sustainable preparation conditions and quality parameters of dehulling seeds from the various fractions at constant huller rotor speed were determined. First demonstrated the role of subzero temperatures as a factor in the integrated process control of dehulling. Temperature reduction of initial seeds dehulling from +20°C to -30 °C, with keeping all other parameters unchanged, increased the degree of dehulling by 10,8–14,7 %, increase the kernel fraction by 19–25 %; increase the solid kernel rate by 16–20 %, and reduce the yield of oilseed dust by 2,5–5,0 times.

Keywords: sunflower seeds, hybrid "Ukrainskyi-F1", fractional composition, dehulling of frozen seeds, moisturing effect, qualitative dehulling parameters.

Мардупенко О.О., аспірант, Григоров А.Б., к.техн.н., доцент,
Сінкевич І.В., к.техн.н., професор

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІТУМІВ З ПОЛІПШЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

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

Ключові слова: нафтовий шлам, окиснення, вуглеводнева фракція, бітум, полімерна добавка, температура розм'якнення, адгезійні властивості.

Вступ. Одним з основних критеріїв ефективності будь-якого виробництва є можливість подальшого використання відходів, які утворюються під час реалізації технологічного процесу. Основним рідким відходом, який утворюється при реалізації технологічних операцій, пов'язаних з видобуванням, транспортуванням, зберіганням та переробкою нафти є нафтовий шлам (НШ) [1]. У загальному випадку, НШ складається з трьох основних компонентів: води, механічних домішок та вуглеводневої частини. Вуглеводнева частина містить високомолекулярні вуглеводні, що забезпечують їй позитивний потенціал властивостей, який може бути реалізований при виробництві з неї будівельних матеріалів, наприклад різних марок бітумів, що на сьогоднішній день є дуже затребуваними нафтопродуктами [2, 3].

Технологія отримання бітумів. Сьогодні, для отримання бітумів використовують такі технології [4, 5]: концентрування нафтових залишків шляхом перегонки їх у вакуумі в присутності водяної пари або інертного газу, окиснення киснем нафтових залишків, компаундування різних нафтових залишків з дистилатами з окисненими або залишковими бітумами. Для поліпшення експлуатаційних властивостей та підвищення довговічності, отриманих за цими технологіями бітумів, використовують поверхнево активні речовини (ПАР) або синтетичні полімерні матеріали. Введення синтетичних полімерних матеріалів у бітуми значно розширює температурні діапазони їх застосування, підвищує стійкість до деформацій та адгезійні властивості [6, 7, 8, 9].

Враховуючи усе, що наведено вище, запропонуємо схеми, реалізуючи які в умовах виробництва, використовуючи, у якості сировини НШ, можна отримати нафтові бітуми з поліпшеними експлуатаційними властивостями (див. рис. 1).

Загальною початковою стадією технологічного процесу, для схем, що наведені на рис. 1. є видалення з НШ вуглеводневої частини у апаратах спеціальної конструкції - декантерах. При цьому, утворюються побічні продукти у вигляді води та механічних домішок. Вода після біологічної очистки використовується у теплообмінній апаратурі та для отримання водяної пари, а механічні домішки – знайшли застосування, як наповнювач при виробництві асфальтобетону [10]. Далі, вуглеводнева фракція подається на концентрування, яке може проходити у колонах або апаратах реакторного типу, які працюють, як при вакуумі, так і при атмосферному тиску. В останньому випадку значно знижуються виробничі витрати, пов'язані з експлуатацією системи створення вакууму, але і разом з цим, глибина відбору легких фракцій. Кінцева температура концентрування вуглеводневої фракції НШ, не повинна перевищувати температуру при якій з високомолекулярних речовин починають утворюватися гази [11]. На даній стадії побі-

чними продуктами є вуглеводневі гази та рідка вуглеводнева фракція, з температурою кипіння до 360–380 °С.

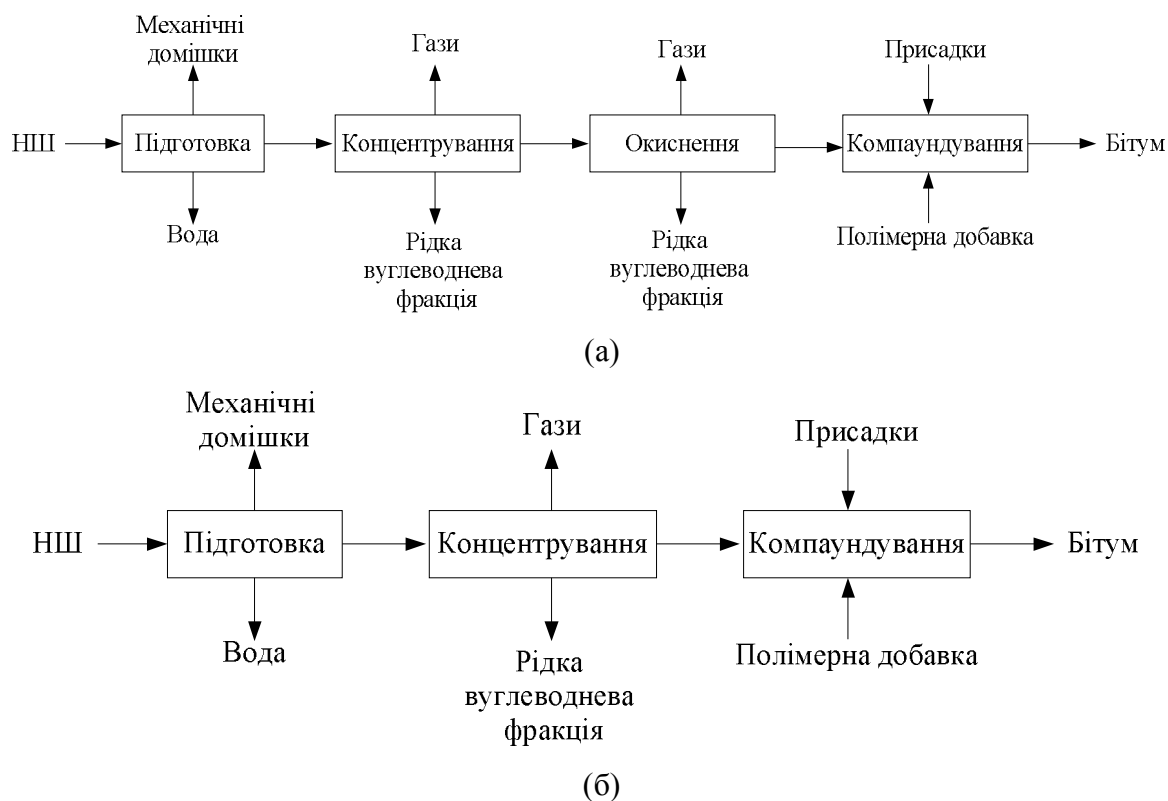


Рисунок 2 – Схеми виробництва бітумів з поліпшеними експлуатаційними властивостями:
 а) з окисненням концентрованої сировини; б) без окиснення концентрованої сировини

Гази скидаються на факел, а рідка вуглеводнева фракція, використовується для забезпечення потреб виробництва. Далі за схемою (див. рис. 1,а), відбувається окиснення концентрованої сировини, у результаті чого, утворюються гази окиснення (окси сірки та азоту, водяні пари) та легка вуглеводнева фракція – чорний соляр, яка використовується для промивки цистерн, резервуарів, або, як технологічне паливо. У результаті хімічних реакцій, сировина набуває властивостей, які відповідають вимогам нормативної документації до бітуму. Після окиснення в продукт, на стадії компаундування, для поліпшення експлуатаційних властивостей додають полімерні добавки, зокрема поліпропілен (ПП). Також, на цій кінцевій стадії, у бітум за необхідністю, можна додавати адгезійні та протикорозійні присадки [12]. У схемі на рис. 1, б стадія окиснення відсутня, а формування властивостей бітуму відбувається за рахунок диспергування у концентрованій сировині при температурі 160-180°С, полімерних добавок, що характеризується меншими енергетичними витратами, у порівнянні зі схемою на рис. 1,а.

Лабораторні дослідження. При реалізації наведених схем, у лабораторних умовах, були отримані зразки бітумів №1(схема рис. 1,а) і № 2 (схема рис. 1, б), які містили по 5 % мас. подрібненого ПП. Показники якості цих проб та стандартного нафтового дорожнього бітуму, марки БНД-90/130, наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Показники якості отриманих проб бітуму

№ п/п	Найменування показника	Бітум БНД-90/130	Бітум №1	Бітум №2
1	Пенетрація, мм 10 ⁻¹	129	91	114
2	Температура розм'яккання (К і Ш), °С	46	102	80
3	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	233	235	227
4	Зміна маси після прогріву, %	0,93	0,60	1,00
5	Розчинність в органічному розчиннику, %	99	94	95
6	Адгезійні властивості, «активне» зчеплення з мармуром і піском за контрольним зразком	Витримує		

Висновки. Проведені дослідження показали, що проби, бітумів, які містили по 5 % мас. добавки, у вигляді подрібненого ПП, за більшістю досліджених показників якості, відповідають, а за окремими показниками (пенетрація та температура розм'яккання) значно перевищують вимоги, що висуваються до нафтового дорожнього бітуму, марки БНД-90/130. Зважаючи на це, запропоновані схеми отримання з нафтового шламу, бітумів з поліпшеними експлуатаційними властивостями є досить перспективними технологіями, та потребують свого подальшого дослідження та промислового впровадження на нафтохімічних виробництвах України.

Література

1. Oil Sludge Treatment Processes / S.V. Egazar'yants, V.A. Vinokurov, A.V. Vutolkina, M.Yu. Talanova, V.I. Frolov, E.A. Karakhanov // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2015. – Volume 51. – Issue 5. – pp. 506–515.
2. Razali M.N. Formulation of bitumen from industrial waste / M.N. Razali, M. Lukman Hakim, M. Musa, R. M. Yunus // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016.– № 11(8). – 5244.
3. Kuriakose A.P. Bitumenous paints from refinery sludge/A.P. Kuriakose, S. Kochu, B. Manjooran // Surface and Coatings Technolgy.–2001.–Volume 145.–Issues1–3.–pp.132–138.
4. Bitumen quality and manufacturing processes-past and present technological status // Indian Journal of Chemical Technology. – 1997. – Vol. 4. – pp. 259–276.
5. Production of Rubberized Bitumen by oxidation of black oil / Tileuberdi E., Ongarbayev Y.K., Imanbayev Y.I., Tulepov M.I., Mansurov Z.A., Tuleutaev B.K.// Material Science and Environmental Engineering. – CRC Press, 2016. – P. 183–186.
6. Himmat S. Upgrading Iranian petroleum sludge using polymers / E. Karami, T. Jafari Behbahani / S. Himmat, K. J. Pankaj // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2018. – Volume 8. – Issue 4. – pp. 1319–1324.
7. Toraldo E. Effects of polymer additives on bituminous mixtures / E.Toraldo, E. Mariani // Construction and Building Materials. – 2014. – Volume 65. – pp. 38–42.
8. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances / M. Porto, P. Caputo, V. Loise, S. Eskandarsefat, B. Teltayev, C. Oliviero Rossi // Applied Science.– 2019. – № 9(4). –742.

9. Moreno-Navarro F. Structural analysis of polymer modified bituminous materials in the rehabilitation of light-medium traffic volume roads / F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, M.C. Rubio-Gámez // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – №156. – pp. 621–631.

10. Alternative fillers for the production of bituminous mixtures: A screening investigation on waste powders / C. Sangiorgi, P. Tataranni, F. Mazzotta, A. Simone, V. Vignali and C. Lantieri. *MDPI Coatings*. – 2017. – № 7(6). – 12 p.

11. Wenzhi Zhao. New Insight into the Kinetics of Deep Liquid Hydrocarbon Cracking and Its Significance / Wenzhi Zhao, Shuichang Zhang, Bin Zhang, Kun He, Xiaomei Wang // *Geofluids*. – 2017. – 11 p.

12. Pereira R. Warm mix asphalt: Chemical additives' effects on bitumen properties and limestone aggregates mixture compactibility / R. Pereira, A. Almeida-Costa, C. Duarte, A. Benta // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2018. – Volume 11. – Issue 3. – pp. 285–299.

УДК 665.775.4

Мардупенко О.О., Григоров А.Б., Сінкевич І.В.

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ БІТУМІВ З ПОЛПШЕННИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Запропоновано розширення сировинної бази технологічного процесу отримання нафтових бітумів за рахунок використання нафтового шламу – небезпечного промислового відходу, який накопичується у технологічному обладнанні при реалізації процесів підготовки, транспортування та зберігання та переробки нафтової сировини. Розглянуто варіанти схем переробки нафтового шламу, які складаються з стадії попередньої підготовки (видалення води і механічних домішок), концентрування висококиплячої вуглеводневої фракції (температура кипіння $>360\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$), окиснення (або мінуючи стадію окиснення) цієї фракції та компаундування її з присадками та полімерною добавкою, яка використовується для отримання бітуму з поліпшеними властивостями.

Визначено, що отримати бітуму з заданим рівнем властивостей, можна здійснювати минаючи стадію окиснення концентрованої сировини, а лише за рахунок диспергування у ній полімерних добавок, що значно підвищить енергоефективність виробництва.

Отримані за цими схемами бітуми, які містили по 5 % мас. добавки подрібненого поліпропілену за показниками penetрації (на $15\text{--}38\text{ мм}\cdot 10^{-1}$) та температури розм'яккання (на $34\text{--}56\text{ }^{\circ}\text{C}$), перевищують показники якості нафтового дорожнього бітуму, марки БНД-90/130.

Ключові слова: нафтовий шлам, окиснення, вуглеводнева фракція, бітум, полімерна добавка, температура розм'яккання, адгезійні властивості.

Мардупенко О.О., Григоров А.Б., Сенкевич І.В.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЕ БИТУМОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Предложено расширить сырьевую базу технологического процесса получения нефтяных битумов за счет использования нефтяного шлама – опасного промышленного

отхода, который накапливается в технологическом оборудовании при реализации процессов подготовки, транспортировки, хранения и переработки нефтяного сырья. Рассмотрены варианты схем переработки нефтяного шлама, состоящие из стадии предварительной подготовки (удаление воды и механических примесей), концентрирование высококипящей углеводородной фракции (температура кипения $> 360\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$), окисления (или минуя стадию окисления) этой фракции и компаундирования ее с присадками и полимерной добавкой, которая используется для получения битума с улучшенными свойствами.

Определено, что получить битума с заданным уровнем свойств, возможно без стадии окисления концентрированного сырья, а за счет диспергирования в нем полимерных добавок, что значительно повышает энергоэффективность производства.

Полученные по этим схемам битумы, содержащие по 5 % масс. добавки измельченного полипропилена по показателям пенетрации (на $15\text{--}38\text{ мм } 10^{-1}$) и температуре размягчения (на $34\text{--}56\text{ }^{\circ}\text{C}$), превышают показатели качества нефтяного дорожного битума, марки БНД-90/130.

Ключевые слова: нефтяной шлам, окисление, углеводородная фракция, битум, полимерная добавка, температура размягчения, адгезионные свойства.

Mardupenko O., Grigorov A., Sinkevich I.

TECHNOLOGY PRODUCTION OF BETUMS WITH IMPROVED OPERATIONAL PROPERTIES

It is proposed to expand the raw material base of the technological process for producing oil bitumen through the use of oil sludge - hazardous industrial waste that accumulates in technological equipment during the implementation of the processes of preparation, transportation, storage and processing of oil raw materials. Variants of schemes for processing oil sludge are considered, consisting of a preliminary preparation stage (removal of water and solids), concentration of a high boiling hydrocarbon fraction (boiling point $> 360\text{--}380\text{ }^{\circ}\text{C}$), oxidation (or bypassing the oxidation stage) of this fraction and compounding it with additives and a polymer additive, which is used to produce bitumen with improved properties.

It was determined that it is possible to obtain bitumen with a given level of properties without the oxidation stage of concentrated raw materials, and by dispersing polymer additives in it, which significantly increases the energy efficiency of production.

Obtained by these schemes bitumen containing 5 % of the mass. additives of crushed polypropylene in terms of penetration (by $15\text{--}38\text{ мм} \cdot 10^{-1}$) and softening temperature (by $34\text{--}56\text{ }^{\circ}\text{C}$) exceed the quality indicators of oil road bitumen, grade BND-90/130.

Keywords: oil sludge, oxidation, hydrocarbon fraction, bitumen, polymer additive, softening point, adhesive properties.

Арсеньєва О.П.¹, д.техн.н., професор, Фрідлер Ф.³, доктор наук, професор,
Орош А.², аспірант, Капустенко П.О.¹, к.техн.н., професор

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ Р-ГРАФІВ

¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна

²Кафедра інформатики та системних технологій, Університет Панонії, Веспрем,
Угорщина

³Інститут інженерії технологічних процесів та сталого розвитку,
Католицький Університет Петера Пазманя, Будапешт, Угорщина

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, інтеграція тепла, теплообмінні мережі.

Вступ. Існуючі методи синтезу технологічних мереж в основному базуються на математичному моделюванні та супер-структурах. Для цього використовуються методи лінійного чи нелінійного програмування зі змішаним цілим числом, або комбінаторні підходи. Інтеграція тепла при синтезі технологічних процесів є надзвичайно складним завданням в інженерії технологічних систем і має велике значення для сталого функціонування промислових установок. Сучасні підходи включають пінч-технологію, моделювання, евристичне та частково-цілочислове програмування на основі супер-структури [1].

Синтез технологічної мережі повинен включати ефективну теплову інтеграцію системи теплопостачання, розподілу та використання енергії, включаючи всі інші існуючі джерела енергії та споживачі тепла. Така система може включати велику кількість потоків, які потребують нагрівання, і потоків, які мають теплову енергію, що можна використовувати по мірі їх охолодження. Ці потоки можуть обмінюватися тепловою енергією з використанням теплообмінного обладнання, які розглядаються як система пристроїв, що перетворюють теплову енергію гарячих потоків у теплову енергію холодних потоків, та їх сукупність представляє теплообмінну мережу підприємства. При одній і тій же системі потоків структура теплообмінної мережі і ділянки теплообміну, на яких використовуються окремі теплообмінники, можуть значною мірою змінюватися при різних значеннях таких параметрів, як теплові витрати, чисельність теплообмінників, площа передачі тепла та вартість апаратів.

Синтез теплової мережі підприємства являє собою проблему пошуку її структури, параметрів, та конструкції теплообмінних апаратів, які відповідають оптимуму певної цільової функції. Широко прийняті підходи до проектування теплових мереж підприємств – це математичне програмування, Пінч-аналіз та супер-структури.

Супер-структурний підхід при застосуванні до синтезу теплової мережі спирається на розробку звідної структури розглянутої мережі. Зазвичай супер-структура розробляється поетапно або блоками, кожен з яких являє собою групу з декількох послідовних інтервалів зміни ентальпії. У межах блоку кожен гарячий технологічний потік розбивається на ряд гілок, що відповідають кількості холодних потоків, представлених у блоці, і всі холодні потоки поділяються однаково. Після цього необхідно сумістити

кожну гарячу гілку з кожною холодною гілкою. Після розробки супер-структура піддається оптимізації. Набір рішень включає варіювання різних розділених гілок потоку і теплообмінників, теплових навантажень і розділених фракцій або швидкостей потоку розділених потоків. Цільова функція передбачає переважно загальну річну вартість мережі, хоча ця функція може бути доповнена певними додатковими умовами для подолання складних обмежень. Оскільки процедура оптимізації приймає структурні, а також процесні рішення щодо мережі, що проектується, вона є параметричною оптимізацією. Залежно від того, які припущення прийняті, може виникнути задача частково-цілочислового лінійного або нелінійного програмування. Лінійні задачі зазвичай отримують, передбачаючи ізотермічне змішування розщеплених гілок, а потім за допомогою кускової лінеаризації функцій капітальних витрат теплообмінника. При підході до надбудови можна включити й інші варіанти теплообміну – наприклад, прямі теплообмінні установки (тобто змішування) та різні типи теплообмінників (наприклад, двотрубний, пластинчастий, пластинчасто-реберний, кожухотрубний та інші).

Методологія супер-структур має декілька переваг при синтезі теплових мереж. Серед них: здатність одночасно оцінювати велику кількість структурних та експлуатаційних альтернатив; можливість автоматизації (у значній мірі) процедури синтезу; і здатність ефективно вирішувати багато додаткових питань, таких як вибір різних типів теплообмінників та залучення додаткових обмежень.

Концепція Р-графів, або процес-графів, є одним з ефективних інструментів інтеграції синтезу технологічних та теплових мереж [2]. Він застосовується для синтезу мереж, що пов'язані між собою, і здатний генерувати тільки n найкращих або всі технологічні мережі на додаток до оптимальної. Інтеграція проектування теплових мереж підприємства з Р-графами є багатообіцяючою, а можливість вибору вдосконаленого обладнання для передачі тепла розширить його застосування, забезпечивши сучасні рішення для промисловості.

Концепція Р-графів. Р-графи – це комбінаторний інструмент для синтезу технологічних мереж, який представляє супер-структуру за допомогою двостороннього графіка матеріалів та операційних підрозділів. Підхід базується на фундаментальних комбінаторних властивостях можливих технологічних структур. Ці властивості є загальними і не залежать від типів математичних моделей операційних блоків, отже, структура також є загальною.

Проблема синтезу мереж технологічних процесів у представленні Р-графів задається наборами операційних блоків з їх математичними моделями, сировиною (або утилітами) з їхніми одиничними цінами та продуктами з необхідними обсягами виробництва. Цільова функція також задається як функція параметрів операційних блоків і матеріалів (або утиліт) процесу. Комбінаторні властивості мережі операційних підрозділів процесу зібрані та формально описані як сукупність комбінаторних доцільних структур, сформульованих у п'яти аксіомах [3]. Пошук оптимальної мережі на Р-графі може бути зведений до безлічі комбінаторних доцільних мереж без ризику втрати оптимальності, забезпечуючи велике прискорення в пошуку оптимального процесу.

Допустимо, що M – заданий непустий набір об'єктів, заданий як різновиді матеріалів або матеріали, які трансформуються в процесі виробництва. Трансформація між двома підмножинами з набору M протікає у функціональній одиниці (operating unit – O), як продемонстровано на рис. 1, де коло відображає матеріал, а горизонтальна полоса – функціональну одиницю процесу. Цю функціональну одиницю необхідно сполучити з іншими функціональними одиницями за допомогою цих двох множин (матері-

алів та функціональних одиниць). Р-граф (M, O) містить взаємозв'язки між функціональними одиницями множини O (рис. 2).

Для пошуку оптимального рівня інтеграції тепла застосовується алгоритм гілок та меж, описаний в [4].

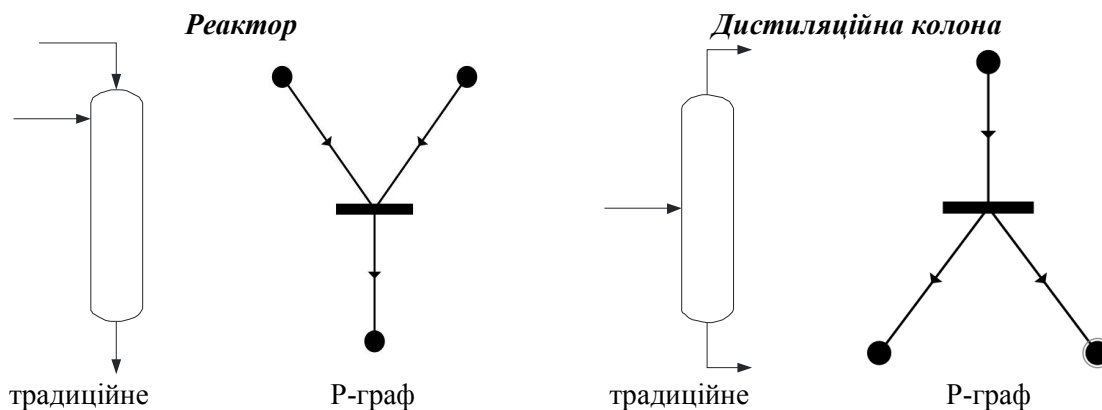


Рисунок 1 – Традиційне та Р-граф зображення реактору та дистиляційної колони

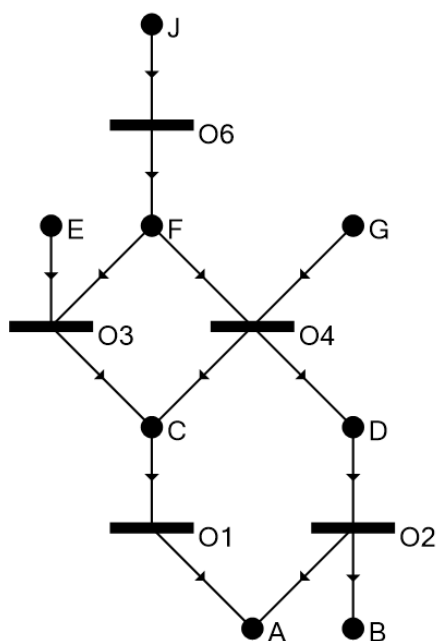


Рисунок 2 – Р-граф зображення мережі функціональних одиниць

У роботі [4] зазначено, що комбінаторний характер синтезу технологічної мережі на основі Р-графа може бути зручно поєднаний із методом інтеграції теплової мережі на основі композицій температурних інтервалів. Одночасне рішення синтезу технологічної та теплової мереж, засноване на алгоритмах Р-графів для технологічної мережі та специфічному алгоритмі інтеграції теплової мережі, виявилось корисним. Однак, оскільки в [4] інвестиційна вартість теплообмінника вважалася пропорційною площі теплообміну, вартість витрат не обов'язково була реалістичною. У роботі [5] розглянутий цей підхід було удосконалено наступним чином: функція витрат теплообмінника була узагальнена до лінійної або нелінійної функції з фіксованими параметрами, крім

того, проблема інтеграції теплообмінної мережі була однорідно вбудована в проблему синтезу технологічної мережі, що призводить до уніфікованої методики створення оптимального рішення одночасно розглянутих задач синтезу технологічної та теплової мереж. Але в обох роботах розглядаються тільки кожухотрубні теплообмінні апарати. Спроба розширити даний підхід та ввести розрахунок вартості пластинчастого теплообмінного обладнання, що може суттєво скоротити затрати на теплову мережу, розглядається в даній роботі.

Ілюстрація підходу для інтегрованого рішення синтезу технологічної та теплової мереж. Для ілюстрації підходу була розглянута технологічна мережа, супер-структура якої представлена на рис. 3(а). Літерою *H* позначені теплообмінні апарати для нагрівання матеріального потоку, літерою *C* – для охолодження. На рис. 3(б) показана максимальна структура даної технологічної мережі у вигляді Р-графа. Вузли O1, O2 та O3 на рис. 3(б) являють собою функціональні одиниці, тоді як вузли C1, H1 та H2 – теплообмінні вузли для охолодження та нагрівання. В таблицях 1 і 2 включені дані температур і теплоємності для кожного з теплообмінників для нагрівання та охолодження, а також параметри утилітних потоків. Необхідна кількість продукту, розглянутого в прикладі становить 50000 т/рік.

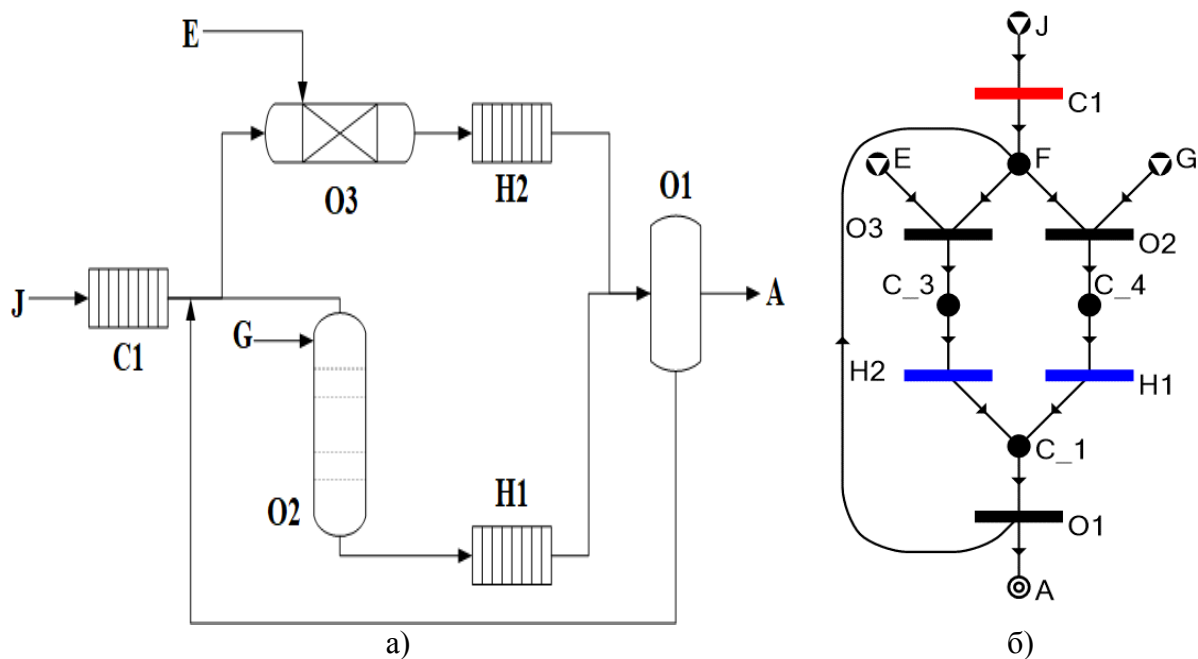


Рисунок 3 – Приклад для ілюстрації підходу: (а) супер-структура технологічної мережі; (б) максимальна структура у вигляді Р-графа

Таблиця 1 – Параметри для нагрівання та охолодження матеріальних потоків

Теплообмінник	T_{in} , К	T_{out} , К	C_p , кДж/(кг·К)
C1	298	353	4.15
H1	373	308	2.37
H2	363	308	2.37

Таблиця 2 – Параметри утилітних потоків

Вид потоку	T_{in} , К	T_{out} , К	Вартість, USD/ГДж
Гарячий	373	373	4.15
Холодний	393	308	2.37

По-перше, гарячі та холодні матеріальні потоки розбиваються на під-потоки на основі початкових та кінцевих температур інших потоків, як це описано у [4]. Потім генеруються композитні потоки з подальшим розширенням максимальної структури з усіма можливими теплообмінниками, включаючи потенційні інтеграції тепла, та отримують розвинену схему, представлену на рис. 4. Максимальна структура з цими теплообмінниками називається інтегрованою максимальною структурою. Оскільки матеріальний потік може мати різні температури через реалізацію процесу, відповідні потоки повинні бути відповідно представлені різними вузлами інтегрованої максимальної структури (наприклад, Н1_363 та Н1_373). Наприклад, теплообмінник HE2 знижує температуру потоку Н1 з 373 К до 363 К, збільшуючи температуру потоку С1 від 298 К до 353 К. Відповідні потоки позначаються Н1_373, Н1_363, С1_298 та С1_353 відповідно.

Вибір оптимальної структури з використанням пластинчастих теплообмінних апаратів. Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА) належать до теплообмінників з посиленою теплопередачею [6]. Для вибору їх оптимальної конструкції, які будуть відповідати заданим технологічним умовам, необхідно визначити оптимальні геометричні параметри пластин теплопередачі, які утворюють канали для руху теплоносіїв в теплообміннику. ПТА різної конструкції (розбірні, паяні, зварені) – один з найефективніших типів компактних теплообмінників, що застосовуються в промисловості. Вони вже довели свою ефективність та надійність у різних промислових сферах застосування. Принципи проектування та експлуатації ПТА добре описані в літературі, наприклад [7], [8].

Для визначення теплопередачі та гідравлічних характеристик ПТА в залежності від геометричних параметрів пластин та їх гофрування, існують узагальнені кореляції [9]. Вони дозволяють детально проектувати ПТА та обчислювати оптимальні геометричні параметри пластин та конфігурацію апарату для заданих умов процесу. Включення такої моделі в програмне забезпечення для проектування теплообмінних мереж дає можливість отримати оптимальну топологію мережі з мінімальною поверхнею теплообміну. При визначенні оптимальної довжини та швидкості теплообмінника для повного використання допустимого перепаду тиску, був застосований підхід, описаний у роботі [10]. Це дозволило створити математичну модель ПТА для визначення оптимальних апаратів в структурі Р-графів. Створене програмне забезпечення може бути включено до загального програмного пакету дизайну технологічних мереж на основі Р-графів. Для розробки програмного модуля використаний принцип оптимізації самої пластини та геометричних параметрів гофри для найбільш поширених типів гофрування. У створеному програмному забезпеченні проблема пошуку найкращої геометрії пластин для заданих технологічних умов, визначена на етапі пошуку комбінаторних можливих позицій та різноманітних навантажень для всіх теплообмінників, вирішується шляхом пошуку оптимального значення для безперервної нелінійної цільової функції в просторі дискретно-постійних змінних. На основі розробленої моделі ПТА та створеного програмного забезпечення розробляється алгоритм оптимізації. Цільовою функцією є мінімальна поверхня теплопередачі, яка буде відповідати мінімальній вар-

тості теплообмінника при оцінці блоку в інтегрованій супер-структурі Р-графу (рис. 4). Інтервал між пластинами, довжина пластини, кут нахилу гофри до вертикальної осі пластини та співвідношення висоти гофри та шагу є оптимізованими змінними. Отримане оптимальне рішення можна розглядати як цільове значення теплообмінної поверхні ПТА, коли геометричні параметри пластини та її гофрування суворо відповідають розрахунковим оптимальним значенням.

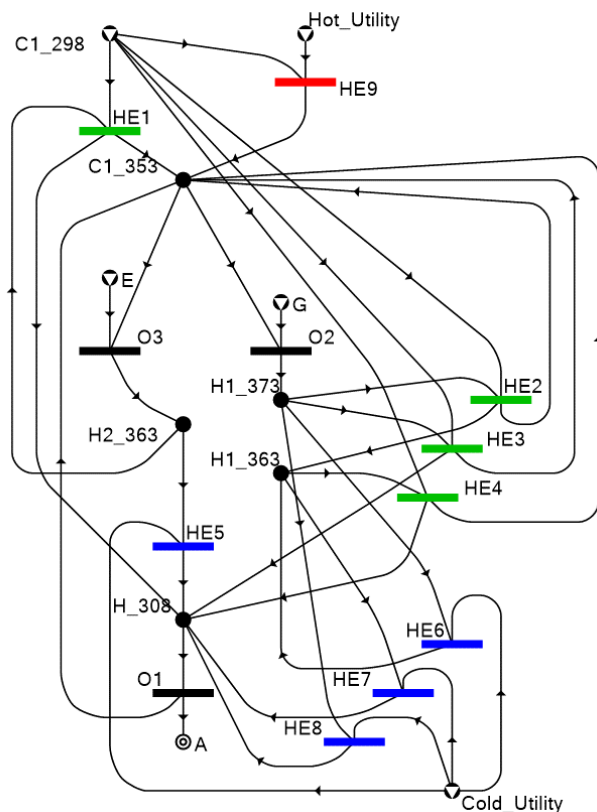


Рисунок 4 – Інтегрована максимальна структура, з відображенням усіх можливих теплообмінних апаратів

Для отримання ціни теплообмінного апарату необхідно визначити залежність від площі поверхні теплопередачі. Дані літератури щодо вартості компактних теплообмінників досить обмежені, особливо коли ці дані необхідні для проведення декількох розрахунків у процесі проектування теплообмінних мереж. У роботі [11] представлено рівняння для визначення встановленої вартості ПТА з пластинами з нержавіючої сталі та каркасом із вуглецевої сталі як функція еквівалентної площі теплопередачі F_e :

$$IC_{PHE} = 1950 \cdot F_e^{0.78} . \tag{1}$$

В роботі [12] надано рівняння для розрахунку вартості розбірного ПТА з пластинами з нержавіючої сталі для діапазону площі поверхні теплопередачі від 50 до 9000 футів² (або $4,65 \text{ m}^2 < F < 836 \text{ m}^2$):

$$C_{PHE} = 231 \cdot F^{0.639} . \tag{2}$$

Ціни на ПТА інших типів, крім розбірних, слід оцінювати за значно різними співвідношеннями. Впровадження паяних ПТА дозволило значно знизити ціни на діапазон поверхонь теплообміну до 80 m^2 , для яких виробляється паяний ПТА. Ці теплообмінники виготовляються методом пайки в стандартизованих розмірах з кроком площі поверхні теплообміну приблизно від 8 до 10 пластин для одного розміру пластини. У роботі [5] зазначено два рівняння для різних діапазонів площі поверхні теплопередачі (площі поверхні приблизно оцінюються відповідно до розміру, конструкції та кількості плит).

Для діапазону площ поверхні $0,13 \text{ m}^2 < F < 5.8 \text{ m}^2$ ціна в Євро визначається:

$$C_{BPHE} = 540 \cdot F^{0.8} . \quad (3)$$

Для пластин більшого розміра, тобто $2 \text{ m}^2 < F < 86 \text{ m}^2$:

$$C_{BPHE} = 805 \cdot F^{0.74} . \quad (4)$$

Оцінка параметрів конструкції та її собівартості для розбірних та паяних ПТА залежно від площі теплопередачі згідно рівнянь (2–4) реалізована у розробленому програмному забезпеченні.

Параметри усіх можливих теплообмінних апаратів, представлених у інтегрованій супер-структурі Р-графу (рис. 4), для яких проводилось визначення вартості, представлені у таблиці 3.

Використовуючи розроблене програмне забезпечення, була проведена оцінка різноманітних конструкцій ПТА з мінімальною площею теплопередачі для кожної позиції та визначена вартість кожного обраного апарату. Результати розрахунків для HE1 та HE9 представлені на рис. 5(а) та 5(б) відповідно. Як можна побачити на малюнку, динаміка зміни вартості зі зміною теплового навантаження має лінійну залежність. Цей факт дає можливість отримати оптимальні супер-структури з застосуванням ПТА у концепції Р-графів.

Таблиця 3 – Параметри теплообмінних апаратів інтегрованої супер-структури

№	Температура гарячого теплоносія (1)		Температура холодного теплоносія (2)		Границі зміни теплового навантаження	
	T_{lin} , К	T_{lout} , К	T_{2in} , К	T_{2out} , К	Q_{min} , kW	Q_{max} , kW
HE1	363	308	298	353	30	105
HE2	373	363	298	353	35	60
HE3	373	308	298	353	330	370
HE4	363	308	298	353	260	320
HE5	363	308	293	308	250	320
HE6	373	363	293	308	35	60
HE7	373	308	293	308	200	320
HE8	363	308	293	308	240	370
HE9	373	373	298	353	20	130

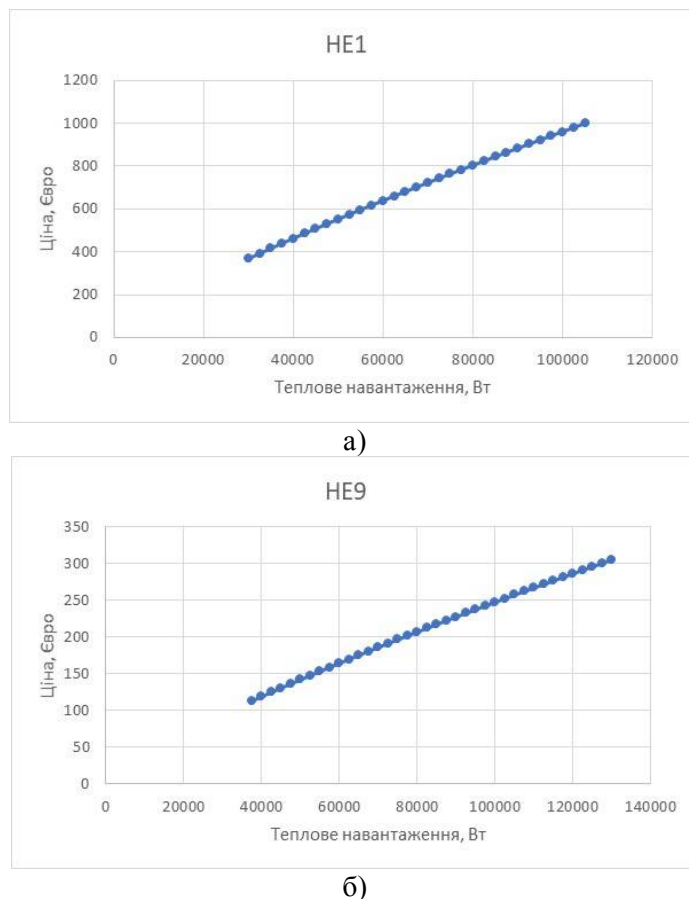


Рисунок 5 – Вартість оптимальних ПТА для різних теплових навантажень: (а) HE1; (б) HE9

Висновки. У статті представлено підхід до вибору оптимальної конструкції розбірних та паяних пластинчастих теплообмінників для теплообмінної мережі з інтеграцією в концепцію Р-графів. Розроблене програмне забезпечення дозволяє встановити оптимальну конструкцію теплообмінників для рідини-рідина. Отримані результати показали лінійну залежність ціни від теплового навантаження для ПТА. Це дозволить ввести теплообмінні апарати пластинчастого типу при побудові інтегрованих суперструктур для Р-графів та визначити оптимальну структуру теплової мережі із застосуванням ПТА при синтезі технологічних мереж підприємств.

Література

1. Smith R., Jobson M., Chen L. Recent development in the retrofit of heat exchanger networks // *Applied Thermal Engineering*. – 2010. – Т. 30, № 16. – P. 2281–2289.
2. Friedler F., Aviso K. B., Bertok B., Foo D. C. Y., Tan R. R. Prospects and challenges for chemical process synthesis with P-graph // *Current Opinion in Chemical Engineering*. – 2019. – Т. 26. – P. 58–64.
3. Friedler F., Tarján K., Huang Y.W., Fan L.T. Graph-theoretic approach to process synthesis: axioms and theorems // *Chemical Engineering Science*. – 1992. – Т. 47, № 8. – P. 1973–1988.
4. Nagy A. B., Adonyi R., Halasz L., Friedler F., Fan L. T. Integrated synthesis of process and heat exchanger networks: algorithmic approach // *Applied Thermal Engineering*. – 2001. – Т. 21, № 13. – P. 1407–1427.

5. Orosz A., Pimentel J., Friedler F. Simultaneous Synthesis of Processes with its Heat Exchanger Networks: P-graph Approach // Chemical Engineering Transactions. –2019. – Т. 76. – P. 1219–1224.
6. Wang Y., Pan M., Bulatov I., Smith R., Kim J.-K. Application of intensified heat transfer for the retrofit of heat exchanger network // Applied Energy. – 2012. – Т. 89, № 1. – P. 45–59.
7. PHEs. Design, Applications and Performance. / Wang L., Sunden B., Manglik R. M. – Southhampton, UK: WIT Press, 2007.
8. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. / Klemes J. J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L.: CRC Press, 2015. – 354 p.
9. Arsenyeva O. P., Tovazhnyansky L. L., Kapustenko P. O., Demirskiy O. V. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2012. – Т. 46, № 6. – P. 634–641.
10. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions // Energy. – 2013. – Т. 57. – P. 201–207.
11. Hall S.G., Ahmad S., Smith R. Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types // Computers & chemical engineering. – 1990. – Т. 14, № 3. – P. 319–335.
12. Vatauvuk W. M. A potpourri of equipment prices-Part 1 // Chemical Engineering. – 1995. – Т. 102, № 8. – P. 68.

УДК 66.045.01

Арсеньєва О.П., Фрідлер Ф., Орош А., Капустенко П.О.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ТА ВИТРАТ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ Р-ГРАФІВ

Збільшення рекуперації тепла в промисловості та побуті є ключовим моментом зменшення споживання енергії. Це значною мірою може бути досягнуто за рахунок підвищення ефективності як технологічних установок, так і промислового обладнання. Оптимальне визначення структури мережі з технологічним обладнанням - це завдання синтезу технологічної мережі, що включає інтеграцію конструкції процесу з оптимальною інтеграцією тепла. Оскільки вибір технологічної мережі під час синтезу має великий вплив на вартість, надійність та рівень інтеграції тепла, ці три елементи повинні враховуватися одночасно при синтезі технологічних процесів, впроваджуючи більш ефективні системи передачі тепла з покращеною конструкцією. Для його досягнення вкрай необхідний загальний підхід та інструмент моделювання, який одночасно охоплює витрати, надійність та рівень цілей інтеграції тепла для оптимального проектування технологічної мережі. У даній роботі розглядається оптимальний вибір теплообмінного обладнання пластинчастого типу для синтезу теплообмінної мережі підприємства з застосуванням теорії Р-графів.

Ключові слова: теплообмінний апарат, теплопередача, інтеграція тепла, теплообмінні мережі.

УДК 66.045.01

Арсеньева О.П., Фридлер Ф., Орош А., Капустенко П.А.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ И РАСХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ Р-ГРАФОВ

Увеличение рекуперации тепла в промышленности и быту является ключевым моментом уменьшения потребления энергии. Это в значительной степени может быть достигнуто за счет повышения эффективности как технологических установок, так и промышленного оборудования. Оптимальное определение структуры технологической сети представляет собой задачу совместной интеграции промышленного оборудования с оптимальной интеграцией тепла. Поскольку выбор технологической сети во время синтеза имеет большое влияние на стоимость, надежность и уровень интеграции тепла, эти три элемента должны учитываться одновременно при синтезе технологических процессов, внедряя более эффективные системы передачи тепла с улучшенной конструкцией. Для его достижения крайне необходим общий подход и инструмент моделирования, который одновременно охватывает расходы, надежность и интеграцию тепла для оптимального проектирования технологической сети. В данной работе рассматривается оптимальный выбор теплообменного оборудования пластинчатого типа для синтеза технологической сети предприятия с применением теории Р-графов.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплопередача, интеграция тепла, тепловые сети.

Arsenyeva O., Friedler F., Orosz Á., Kapustenko P.

PROCESS NETWORK SYNTHESIS FOR ENERGY AND COST MINIMIZATION USING THE P-GRAPH APPROACH

Increasing heat recovery in industry and household is the key point for reduced energy consumption. It can largely be achieved by improved efficiency of both process plants and equipment units. The optimal determination of the network structure with the processing equipment is the task of process network synthesis, which includes the integration of the process design with optimal heat integration. Since the selection of a process network during synthesis has major influence on the cost, the reliability, and the level of heat integration, these three items must be considered simultaneously in process synthesis, implementing more efficient heat transfer systems with enhanced design. To achieve it, a general approach and modeling tool that simultaneously covers the cost, reliability, and level of heat integration targets is highly demanded for optimal process network design. The present paper discusses the optimal selection of heat exchange equipment of plate type for process network synthesis using P-graph approach.

Keywords: plate heat exchanger, heat transfer, heat integration, heat exchanger networks.

Кусаков С.К., аспірант

ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА НИЗЬКОГО ПОТЕНЦІАЛУ І ВИМОГИ ДО ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТАКОГО ТЕПЛА

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

Ключові слова: джерело тепла, низький температурний потенціал, утилізація тепла, енергетична ефективність, пластинчатий теплообмінник

Вступ

Сталий розвиток сучасного суспільства неможливий без постійного зростання потреби в енергії. Постійне зростання населення та його доходів є ключовими рушіями в зростаючому попиті на джерела енергії. Як прогнозує Міжнародне енергетичне агентство [1], попит на всі форми енергії буде зростати. Викопне паливо має обмежені природні запаси і такі види палива не можуть слугувати основою для сталого розвитку в довгостроковій перспективі. Сьогоднішня частка викопного палива у світовій суміші – 82 %, така сама, як і 25 років тому. Сильне зростання відновлюваних джерел енергії лише знизить це до приблизно 75 % у 2035 році, що означає збільшення споживання викопного палива на 25 % порівняно з 2011 роком. Використання викопного палива для виробництва енергії є причиною більшої частини небезпечних забруднень, викидів парникових газів та викидів вуглекислого газу, спричинених людською діяльністю. Прогнозоване збільшення їх використання неминуче призведе до погіршення екологічної ситуації та небезпечних змін клімату. Такі несприятливі наслідки змушують проаналізувати способи використання енергії викопного палива. Під час виробничих процесів до 20–50 % споживаної енергії втрачається за рахунок відпрацьованого тепла, що міститься в потоках гарячих вихлопних газів і рідин, а також від нагрітих потоків продуктів. У деяких випадках підвищення ефективності в результаті відновлення відпрацьованого тепла може підвищити енергоефективність з 10 % до 50 % [2]. Використання цього тепла може значно підвищити ефективність використання енергії та зменшити спалювання викопного палива для виробництва енергії. Там також показано, що більшість втрат тепла, приблизно 60%, знаходяться в діапазоні низьких температур. Хоча низько-сортне відпрацьоване тепло має нижчу якість як джерело тепла, воно доступне у досить великих кількостях, а його робочий потенціал перевищує потенціал інших джерел з більш високою температурою відпрацьованого тепла.

У цій статті наведено аналіз основних джерел тепла низького потенціалу з температурою нижче 260 °С. Також розглянуто дуже важливе питання вибору компактних теплообмінників для якісного використання енергії з усією суворістю умов, властивих різноманітності їх застосувань.

1. Скидне тепло промислових підприємств

Згідно з аналізом виконаним в Міжнародному Енергетичному Агентстві [1], в 2005 році обробна промисловість споживала найбільше енергії в світі, з часткою 33 %, за нею слідували домашні господарства (29 %) і транспорт (26 %). При цьому частка

промисловості в викидах вуглекислого газу перевищувала 38 %. Від 10 до 50 % енергії, що генерується втрачається при викидах в навколишнє середовище відпрацьованого тепла, здебільшого (близько 60 %) низького потенціалу. Типові джерела тепла низького потенціалу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Типові джерела низькосортного тепла в промисловості та їх температури

Джерело	Температура, °С
Технологічний паровий конденсат	55–88
Охолодження води:	
Центральний контур охолодження води	30–55
Пічні двері	30–55
Підшипники	30–90
Зварювальні апарати	30–90
Ливарні машини	30–90
Печі відпалу	65–230
Компресори	25–50
Насоси	25–90
Двигуни внутрішнього згоряння	65–120
Кондиціонування та штучний холод	30–45
Конденсатори рідин	30–90
Печі сушильні та пекарні	90–230
Гарячі процесові рідини	30–230
Гарячі процесові тверді	90–230
Вентиляційні викиди будівель	20–25

Температура і інші параметри скидного тепла в промисловості сильно залежать від конкретної галузі. Наприклад, теплові викиди в нафтохімічній і нафтопереробній промисловості можуть бути у вигляді забрудненого пара при температурі близько 150 °С або охолоджуючої води близько 30–55 °С, в харчовій промисловості і виробництві напоїв рівень температури може бути близько 80 °С. Найбільший потенціал заощадження тепла в металургійній, цементній, хімічній та нафтохімічній галузях. Найбільш високий рівень енергоефективності відзначений в промисловості Японії і Республіки Корея, за ними слідує Європа і Північна Америка. Рівні енергоефективності в країнах, що розвиваються, і країнах з перехідною економікою демонструють змішану картину. Як правило, рівні ефективності нижче, але там, де останнім часом спостерігається швидке розширення використання новітніх технологій, ефективність може бути досить високою [1]. Енергоспоживання і його ефективність сильно залежать від конкретної галузі.

Поділ потенціалів регенерації скидного тепла між різними процесами в найбільш перспективних галузях хімічної та нафтопереробної промисловості з рекуперації тепла представлено в роботі [2]. Орієнтовні можливості утилізації річних викидів тепла у виробництвах хімічних речовин у США:

Етиленові виробництва	27.01x10 ¹⁵ Дж;
Пропіленові виробництва	5.56 x10 ¹⁵ Дж;
Виробництва Бензол – Толуол – Ксилен	16.14 x10 ¹⁵ Дж;

Сільськогосподарська хімія - добрива	34.61 x10 ¹⁵ Дж;
Содові виробництва	16.15 x10 ¹⁵ Дж;
Всього п'ять ланцюгів	99.47 x10 ¹⁵ Дж;
Орієнтовні додаткові заощадження	211.02 x10 ¹⁵ Дж;
ВСЬОГО Промисловість	310.49 x10 ¹⁵ Дж.

Можливості утилізації викидів тепла на нафтопереробних заводах США згідно даним у книзі [2] загалом сягають $520.16 \cdot 10^{15}$ Дж на рік.

Хімічна, нафтохімічна і інші галузі важкої промисловості розподілені нерівномірно між різними країнами світу. Сектор продуктів харчування і напоїв присутній досить рівномірно, більш точно відповідаючи розподілу населення країн. Існує значний потенціал для утилізації скидного тепла в харчовій промисловості і виробництві напоїв, як це показано в роботі [3]. Тільки у Великобританії цей сектор має близько $10.08 \cdot 10^{15}$ Дж скидного низько потенційного тепла за рік, доступного для рекуперації. Використання цього тепла аналогічно використанню зеленого, або нейтрального по викидах вуглекислого газу джерела енергії, оскільки використовується те, що практично за відсутності утилізації забруднює навколишнє середовище відходами. Тому, коли скидне тепло використовується замість викопних видів палива, відбувається досить істотне скорочення викидів шкідливих речовин та парникових газів, поряд з економією енергії. Наведений аналіз можливого скорочення теплових викидів у розвинутих країнах дозволяє сподіватись що ці показники набагато відносно вищі для менш промислово розвинутих країн та країн з перехідною економікою.

2. Втрати тепла в будинках

У багатьох країнах на житлові та комерційні будівлі припадає близько 40 % від загального попиту на енергію та 36 % від загального обсягу викидів парникових газів, і тому вони вважаються як споживачами, так і виробниками енергії [4]. Опалення приміщень і гаряче водопостачання складають найбільшу частку енергії, що виділяється в житлових будинках. Крім втрат тепла через стіни, вікна, двері та інші будівельні елементи, скидне тепло виходить в навколишнє середовище зі стічними водами і вентиляційним повітрям, які мають низько потенційне тепло з температурою, близькою до внутрішньої температури будівель.

2.1. Стічні води

Гаряча вода має безліч застосувань всередині будівель, включаючи душові, ванни, раковини, посудомийні і пральні машини. Різні громадські та приватні басейни також скидають теплі води в каналізаційні колектори. Як було підтверджено в роботі [5], в більшості з цих видів використання стічні води зберігають значну частину початкової енергії гарячої води у вигляді низько потенційного тепла, яке можна було б утилізувати. Крім того, навіть холодна водопровідна вода нагрівається, коли вона потрапляє в будинок взимку, споживаючи певну кількість енергії яка використовується для опалення приміщень.

Для нагріву води витрачається значна кількість викопних видів палива. Наприклад, як показано в роботі [6] для Нідерландів, близько 23 % споживання природного газу для побутових потреб використовується для нагріву води. У розвинених країнах в останні роки робляться значні зусилля для поліпшення енергетичних характеристик будівель з розробкою і практичною реалізацією таких концепцій, як «Будинок з позитивною енергією», «Будинок з суперізоляцією», «Будинок з нульовою енергією». Дослідження, представлене Шмідом [7], показало, що 15 % теплової енергії, яка подається

в будівлі, надходить в навколишнє середовище через каналізаційні колектори, і ця величина збільшується до 30 % в добре утеплених будівлях з низьким споживанням енергії. Це призвело до того, що в сучасних будівлях каналізаційні труби є одними з найбільших носіїв втрат тепла в будівлях. Для вилучення цього низько потенційного тепла можуть використовуватися різні стратегії, такі як використання тепла приміщення, використання тепла стічних вод. Для реалізації всіх цих стратегій необхідно ефективне обладнання для теплопередачі.

2.2. Витяжна вентиляція

Сучасні енергетично ефективні будівлі навіть добре ізольовані для економії енергії без належної вентиляції не підходять для здорового проживання. Повітря у внутрішніх приміщеннях може бути набагато більш забруднене, ніж навколишнє повітря зовні. Різні біологічні забруднювачі, такі як цвіль, лупа домашніх тварин і пилок рослин, а також такі хімічні речовини, як радон і летючі органічні сполуки, можуть створювати токсичну середу всередині приміщень. Щоб запобігти такій небезпечній ситуації, будівлям необхідна вентиляція протягом дня для підтримки здорового внутрішнього середовища.

У різних країнах діє законодавство, яке встановлює мінімальну вентиляцію. Наприклад Департамент енергії США (USDE) [8] рекомендує, щоб, згідно стандарту Американської спілки інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування (ASHRAE) [9], житлову площу будинку необхідно було вентилувати з інтенсивністю 0.35 повної зміни повітря в приміщенні за годину або 15 куб. футів в хвилину (близько 25 м³/год) на людину, в залежності від того, що більше. Взимку при кімнатній температурі 20 °C і температурі зовні мінус 10 °C це означає, свіже повітря що надходить повинно отримувати на годину близько 940 кДж енергії (0,26 кВт по потужності) на людину для обігріву. Така ж значна кількість теплової енергії низької якості буде втрачена з витяжним повітрям в навколишнє середовище, якщо воно не зазнає рекуперації або не буде використане іншими способами. Системи вентиляції з рекуперацією енергії забезпечують контрольований спосіб вентиляції будинку, зводячи до мінімуму втрати енергії. Вони знижують витрати на обігрів вентильованого повітря взимку, передаючи тепло і / або вологість від теплого внутрішнього повітря, яке випускається, до свіжого (але холодного) повітря. Влітку внутрішнє повітря охолоджує тепле, що надходить припливне повітря, що знижує витрати на кондиціонування. Існує два типи систем рекуперації такої енергії. Вентилятор з рекуперацією тепла, втягує свіже повітря в будинок і одночасно витягає повітря з дому. Під час такого обміну два повітряні потоки проходять через теплообмінник всередині блоку, де тепла енергія від одного повітряного потоку передається іншому. Вентилятор з рекуперацією енергії працює аналогічним чином, за винятком того, що частина вологи в більш вологому повітряному потоці (зазвичай повітря всередині приміщення взимку) передається в потік прийдешнього зовні повітря. З метою рекуперації тепла також можуть використовуватися теплові насоси, які забирають тепло у повітря, що відходить і передають його повітряю що надходить або нагрівальним елементам всередині будівлі, наприклад теплим полам.

3. Отримання енергії при утилізації побутових і промислових відходів

З поліпшенням стандартів життя в сучасному суспільстві і зростанням населення світу споживання різних товарів постійно зростає, що неминуче веде до збільшення кількості відходів в домашніх господарствах і комерційній діяльності. Ці відходи можуть бути важливим джерелом енергії. Його також можна розглядати як зелений, тому що,

при розміщенні відходів на сміттєвих полігонах, при розкладанні вони будуть виділяти не меншу кількість небезпечних для навколишнього середовища забруднюючих речовин і вуглекислого газу порівняно з їх спалюванням. Утилізація відходів є основною метою їх термічної переробки. В ході цього процесу рекуперація тепла стає все більш важливою і невід'ємною частиною сучасних технологій в цій галузі. В даний час технології переробки відходів в енергію (WtE) вважаються максимально можливими і здійсненними [10]. Даний підхід разом з використанням біопалива допомагає зменшити споживання викопних видів палива. Ефективність переходу від енергії хімічних відходів, до її кінцевих корисних форм (тепла або електрики) залежить від ряду аспектів, включаючи типи і властивості відходів, що спалюються, використовувані технології, місцеві умови і поточні ціни на енергію.

4. Поновлювані джерела теплової енергії

Необхідність мінімізувати споживання викопних видів палива і безпека для навколишнього середовища від викидів вуглекислого і парникових газів визнана у всьому світі. Директива 2009/28 / ЄС підтверджує прихильність Європейського Союзу розвитку енергетики в ЄС на основі відновлюваних джерел, стверджуючи обов'язкову мету 20 % частки енергії з відновлюваних джерел до 2020 року. Вона встановлює загальні рамки для утилізації енергії з поновлюваних невикопних джерел, а саме енергії вітру, сонячної, геотермальної, гідротермальної і океанської енергії, гідроенергії, біомаси, газу звалищ сміття, газу очисних споруд та біогазу. Нижче розглядаються можливості сонячних і геотермальних джерел енергії.

4.1. Сонячна енергія

Основним джерелом зовнішньої енергії на Землі є сонячна радіація. За даними довідника [11], її інтенсивність на зовнішньому краю атмосфери становить близько 1353 Вт/м^2 . Це значення відомо як сонячна постійна. Воно дещо змінюється протягом року, будучи найбільшим в січні, коли Земля найближче до Сонця. Це випромінювання частково відбивається назад в космос, частково поглинається в атмосферу, а частково розсіюється. Тільки близько двох третин цієї енергії надходить на поверхню землі в години пік. Цей пік сонячного випромінювання на поверхні Землі становить близько 1 кВт/м^2 . Дані сонячної радіації для конкретного місця часто наводяться в $\text{кВтг} / \text{м}^2$ в день. Наприклад, в різних місцях в США цей показник коливається між 3,5 до $6,8 \text{ кВт/м}^2$ в день. Використання цієї сонячної енергії можна розділити на чотири категорії: 1) пасивна, яка використовує принципи проектування та будівельні матеріали для кращого використання сонячної енергії; 2) сонячна тепла енергія для виробництва низькосортного тепла; 3) сонячно-теплова електрична енергія для виробництва електроенергії, як правило, з використанням високоякісного тепла, виробленого сонячною енергією; 4) сонячне фотоелектричне обладнання для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей.

Теплове використання сонячної енергії в даний час є одним з найбільш поширених застосувань поновлюваних джерел енергії. Необхідна температура низькотемпературного тепла, що виробляється сонячними колекторами, залежить від області застосування. Для обігріву приміщення потрібно температура в діапазоні від 45 до $90 \text{ }^\circ\text{C}$, в залежності від використовуваної технології обігріву приміщення. Для приготування гарячої води з-під крана від 50 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Для промислових процесів це від 60 до $260 \text{ }^\circ\text{C}$ і навіть вище, до $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.1. Сонячні ставки

Сонячний ставок є найпростішою формою сонячного теплового колектора великої площі, що представляє собою просто неглибокий басейн глибиною в кілька метрів, заповнений солоною водою. Солоність води збільшується з глибиною, а градієнт солоності запобігає конвекційним потокам. Сонячна радіація проникає через воду ставка в його нижній шар з концентрованим сольовим розчином. Температура там підвищується, так як поглинене там тепло не може переміститися вгору конвекцією. Тому сонячне тепло зберігається в нижньому шарі ставка. Влітку при температурі навколишнього середовища близько 20 ° С воно може дати теплову енергію з температурою близько 80 °С.

4.1.2. Сонячні колектори

Використання сонячної теплової енергії значно варіюється в різних регіонах світу. Основні області застосування: підготовка гарячої водопровідної води, опалення приміщень, тепlopостачання промислових процесів і охолодження. Основними елементами, які визначають потужність, ефективність і вартість сонячної теплової системи, є сонячні колектори. Основні типи сонячних колекторів, які виробляють низькосортне тепло:

- Неглазуровані колектори (UG);
- Плоскі колектори (FPC);
- Евакуйовані трубні колектори (ETC).

Для кожного з цих типів існує велика кількість різних модифікацій, що випускаються різними виробниками. Більшість з них призначені для виробництва тепла при температурі нижче 95 °С для таких застосувань, як центральне опалення, гаряча вода і опалення басейнів. Високоєфективні плоскі колектори з вакуумною ізоляцією і вакуумні трубчасті колектори можуть виділяти тепло при температурах до 250 °С для таких застосувань, як промисловий нагрів, опріснення, охолодження і т.д. Тепло з температурою до 250 °С і навіть набагато вище може бути отримано за допомогою вдосконалених концентрованих колекторів, таких як лінійні колектори Френеля і параболічних жолобів, сонячні тарілки і сонячні башти, як описано, наприклад. Це тепло середньої і високої якості, яке виходить за рамки цієї статті, використовується для високотемпературних процесів, головним чином для виробництва електроенергії з тепловими циклами пари.

Що стосується сонячних низькотемпературних теплових установок по всьому світу, то, згідно [2], частка вакуумних трубчастих колекторів становить 63 % від загальної встановленої потужності. Частка колекторів цього типу становить до 82 % встановлених останнім часом, в основному через ролі евакуйованих колекторів в Китаї, оскільки це поки найбільший ринок з високими темпами зростання. На відміну від цього, в Європі більшість установок з великими сонячними колекторами засновані на плоских колекторах (FPC) [2]. Найбільший в Європі такий об'єкт в Марсталь, Данія має загальну площу колекторів FPC 33 300 м² з теплової потужністю 23 300 кВт. Найбільша установка з вакуумними колекторами в Вельсі, Австрія, має загальну площу в 10 разів менше, ніж 3388 м², а тепла потужність – 2400 кВт. Всі основні сонячні теплові установки для різних промислових застосувань (харчова, хімічна, автомобільна промисловості), використовують колектори FPC. Зменшити вартість плоских колекторів зі збереженням їх ефективності дозволяє їх виготовлення з використанням полімерних матеріалів [12].

4.2. Геотермальне тепло

Серед відновлюваних джерел енергії використання низько потенційного тепла геотермальної енергії має найбільший досвід роботи з системами централізованого теплопостачання, враховуючи безперервну роботу теплової станції Шод-Ег у Франції з 14-го століття [13]. Всебічний огляд прямого використання геотермальної енергії був зроблений в роботі [14]. Загальна кількість геотермальної енергії, використаної безпосередньо, в 2010 році склала 117 778 ГВтч. Лідерами по щорічному використанню енергії геотермального тепла для централізованого теплопостачання є Ісландія, Китай, Японія, Туреччина, Німеччина і Франція. Крім прямого використання в світі 67 246 ГВтч в 2010 році було використано для вироблення електроенергії. Існує два способи отримання геотермального тепла. У деяких місцях його можна отримати безпосередньо з гарячих джерел, гарячих гейзерів або пари, що йде з-під землі. Наприклад, в Ісландії геотермальна електростанція в Несявеллірі використовує пар, який мимовільно надходить з-під землі. Крім Ісландії, є й інші країни, які мають надійні геотермальні джерела такого роду. Серед них Угорщина, Кенія, США і Росія. Природні мимовільні геотермальні джерела тепла є досить рідкісними винятками. У більшості місць геотермальне тепло повинно бути вилучено. Температура Землі піднімається з глибиною землі. Градієнт температури становить від 20 до 30 °С в більшості країн світу, не рахуючи районів поблизу кордонів тектонічних плит. Типовим методом використання геотермального тепла є закачування холодної води глибоко в землю і відкачування її назад, коли вона нагрівається підземним теплом. Геотермальне тепло відносно дешеве, стійке, надійне і екологічне.

5. Вимоги до теплообмінного обладнання при використанні тепла низького потенціалу

Представлений в цьому розділі аналіз різних низько потенційних джерел тепла показує, що в переважній більшості застосувань нагрівальні середовища джерела тепла не можуть бути використані безпосередньо або змішані із середовищами, які завдають тепло кінцевому користувачеві, передача тепла між цими середовищами повинна бути виконана з рекуперативними теплообмінниками. Крім того, всі методи низькотемпературної модернізації або перетворення її в електроенергію вимагають рекуперативних теплообмінників для здійснення процесів теплообміну газ-газ, газ-рідина, рідина-рідина, випаровування і конденсація. Умови всіх цих процесів сильно розрізняються по температурах, тиску, наявних перепадах тиску, теплофізичних властивостях потоків, тенденціям до забруднення і корозії поверхонь теплообміну. Все розмаїття цих умов процесу не може бути реально здійснене одним типом теплообмінників, як, наприклад, найбільш поширені звичайні кожухотрубні теплообмінники, навіть з технічної точки зору. Інше міркування є економічним, оскільки теплообмінне обладнання може скласти значну частку в капітальних витратах багатьох установок для утилізації низькосортного тепла.

В даний час розробка теплообмінного обладнання з метою задоволення вимог різних застосувань в промисловості, гірничодобувної промисловості, на транспорті, в аерокосмічній та комунальній сферах привела до створення теплообмінників різних типів. Багато з цих типів можуть бути використані в різних застосуваннях низько потенційного використання тепла, які висувують деякі конкретні вимоги. Основні такі вимоги сформульовані нижче.

5.1. Невеликі температурні напори

Як можна судити з наведеного вище аналізу, більшість низько потенційних джерел тепла в промисловості, комунальному секторі, поновлюваних геотермальних і сонячних джерелах мають досить обмежені рівні температури. Для безпосереднього використання цього тепла різниця температур між джерелом і споживачем зазвичай обмежена. Інтеграція процесів - це потужний інструмент для підвищення енергоефективності в різних застосуваннях, включаючи використання низько потенційної теплової енергії. Сучасний стан цієї методології описано в книзі [15]. Переваги інструментів інтеграції процесів для розробки низько потенційних систем утилізації тепла були продемонстровані в ряді публікацій на прикладах різних виробництв: нафтопереробного [16, 17], мінеральних добрив [18], інтеграції різних виробництв промислового майданчика [19,20] та інших. Одним з основних параметрів в інтеграції процесів є мінімальна різниця температур (MTD) в системі рекуперації тепла. Нижча MTD призводить до кращої рекуперації тепла і підвищення ефективності використання енергії, але зі збільшенням вартості рекуперативних теплообмінників. При використанні звичайних кожухотрубних теплообмінників нижня межа мінімальної різниці температур становить близько 10 К з найменшим значенням 5 К, враховуючи їх конструктивні особливості. Використання більш низьких значень MTD без значного збільшення капітальних витрат було б вигідно для енергоефективності рекуперативної системи теплообмінників. Це можливо з іншими типами теплообмінників, заснованих на технологіях інтенсифікації теплопередачі, таких як пластинчаті теплообмінники (ПТО) [2].

5.2. Малі різниці температур

Коли дві рідини обмінюються теплом в теплообміннику, нагріта рідина отримує всю теплову енергію, передану від охолоджувальної рідини, за винятком втрат тепла в навколишнє середовище, які зазвичай невеликі і можуть бути практично усунені за допомогою ізоляції в певних типах теплообмінників. Тим часом корисна частина теплової енергії, яка називається ексергією, втрачається, оскільки неможливо нагрівати холодну рідину до температури, при якій подається гаряча рідина. Ці втрати ексергії можна мінімізувати, нагріваючи холодну рідину якомога ближче до температури подачі гарячої рідини і зводячи до мінімуму різницю температур. Така можливість є в ПТО, як це показано в методиці розрахунку цих апаратів [21]. Можливість точного розрахунку на конкретні умови процесу з заданою малою різницею температур забезпечується наявністю науково обґрунтованих точних кореляцій для розрахунку падіння тиску у ПТО [22], тепловіддачі в умовах газових та водних потоків [23] та інших середовищ [24].

5.3. Зменшення забруднень поверхні теплопередачі

У ряді застосувань низько потенційне тепло виробляється за допомогою речовин, які мають високий вміст матеріалів, що утворюють відкладення на поверхнях теплопередачі, надаючи на неї негативний вплив. Це відноситься до багатьох промислових джерел тепла, геотермальних і стічних вод і т.д. Утворення забруднень призводить до збільшення падіння тиску і збільшення споживання енергії для перекачування середовищ. Зменшення загального коефіцієнта теплопередачі призводить до зменшення кількості енергії, яку повертатимуть в систему, і вимагає, щоб надлишкова площа поверхні була встановлена, щоб уникнути цього. Одним із заходів щодо зниження забруднення є використання поліпшених поверхонь теплопередачі. Наприклад, швидкість забруднення в пластинчастих теплообмінниках, як правило, приблизно в десять разів менше, ніж в звичайних трубчастих для тих же умов [25]. Це вимагає надійних і точних методів для

врахування забруднення в конструкції теплообмінника [26], які в даний час обмежені. Інший метод - періодичне очищення поверхні теплопередачі. Конструкція теплообмінника повинна передбачати процедури очищення для боку потоку з утворенням забруднень як це і передбачає конструкція ПТО.

5.4. Застосування в процесах конденсації газових сумішей

Існує велика кількість низько потенційних джерел, тепла енергія яких передається газовими потоками з присутністю парів здатних до конденсації. За рахунок інтенсифікації процесів переносу тепла та маси [27] ПТО добре зарекомендували себе при роботі в конденсаційних процесах як чистої пари, так і в присутності повітря яке не конденсується [28]. ПТО можуть бути ефективно використані також в процесах конденсації парових сумішей [29] та в умовах низького тиску парів [30].

5.5. Компактність і низька вартість при використанні дорогих матеріалів для теплообмінної поверхні

Існує велика кількість низько потенційних джерел, тепла енергія яких передається потоками з високою корозійною природою, особливо відпрацьоване тепло в хімічній промисловості, на коксових заводах, в стічних водах, в деяких геотермальних областях. Багато тепла втрачається у вигляді пари, що виходить в навколишнє середовище з димовими газами, які у вигляді конденсату утворюють кислотні розчини, які поглинають оксиди з димових газів. У всіх цих випадках поверхня теплопередачі повинна бути виготовлена з матеріалів і металевих сплавів з більш високою корозійною стійкістю. Це може зробити такий теплообмінник дуже дорогим і навіть заборонити використання тепла з економічних міркувань. Проблема може бути вирішена за допомогою компактних поліпшених поверхонь теплопередачі ПТО [2], які можуть зажадати набагато менших кількостей дорогого матеріалу для їх виробництва, що призводить до достатнього зниження вартості теплообмінника. Для підвищених температур і тиску потоків теплоносіїв розроблені спеціальні зварні конструкції [31], в яких відсутні гумові ущільнення.

Залежно від конкретних застосувань, які численні при використанні низько потенційного тепла, можуть виникнути інші вимоги до теплообмінників. Тому, щоб вибрати правильний тип і необхідну конструкцію, слід проаналізувати всю різноманітність наявного обладнання для теплопередачі, щоб знайти найкраще рішення на ринку або поліпшити його з подальшою розробкою для даного випадку.

6. Висновки

Сталий розвиток сучасного суспільства потребує зростання потреб в енергії. В умовах обмежених запасів викопного палива, спалення якого до того ж дуже шкідливе для навколишнього середовища, цю проблему можна вирішити скорочуючи втрати теплової енергії та використовуючи більше відновлюваних джерел енергії. До 80 % втрат теплової енергії та енергії її відновлюваних джерел трапляється з потоками маючими низький температурний потенціал до 260 °С. Це потоки після промислових процесів, стічні води та вентиляційне повітря будівель, тепло спалювання промислових та побутових відходів, тепло сонячних колекторів та геотермальне тепло. Для використання такого тепла потрібні високоефективні пластинчаті теплообмінні апарати. Вони відповідають всім умовам необхідним для ефективною утилізації тепла низького потенціалу.

Література

1. IEA. 2019. World Energy Outlook 2019 <https://webstore.iea.org/download/summary/2467?fileName=English-WEO-2019-ES.pdf> (Accessed 20th November 2019).
2. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015, Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Law R., Harvey A., Reay D. 2013. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. Applied Thermal Engineering 53: 188-196.
4. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P. 2013. Process Integration for Energy Saving in Buildings and Building Complexes. Chapter 31 in Handbook of Process Integration (PI), Edited by Klemeš J.J., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK: 938-965. ASHRAE. 2013., Handbook Fundamentals. www.ashrae.org. (Accessed 10th April 2014).
5. Cipolla S.S., Maglionico M. 2014. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. Energy Procedia 45: 288 – 297.
6. Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M. 2013. The potential of (waste) water as energy carrier. Energy Conversion and Management 65: 357–363.
7. Schmid F., 2009, Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers, Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants. Zürich, Switzerland. 10p.
8. Energy Saver. 2019. Whole house ventilation systems. USDE. <https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/ventilation/whole-house-ventilation> (Accessed 27th November 2019).
9. ASHRAE Handbook Fundamentals, 2017, <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook> (accessed 30 November 2019).
10. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., Tovazhnyansky L. L., Arsenyeva O., Kapustenko P. O. 2014. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies—Energy recovery from flue gas. Applied Thermal Engineering 64(1): 213–223.
11. Doty S., Turner W. C. 2009. Energy management handbook. The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA, USA.
12. Selikhov Y.A., Kotsarenko V.A., Klemes J.J., Kapustenko P.O.– 2018. The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit. Chemical Engineering Transactions, 70, 2053–2058.
13. Rezaie B., Rosen M.A. 2012. District heating and cooling: review of technology and potential enhancements. Applied Energy 93: 2–10.
14. Lund J.W., Freeston D.H., Boyd T.L. (2011), Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, Geothermics, 40, 159–180.
15. Klemeš J., editor, 2013. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of energy and water use, waste and emissions. Woodhead Publishing/Elsevier, Cambridge, UK.
16. Клемеш Й., Костенко Ю.Т. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО А.Ю., ЗУЛИН Б.Д. (1999). Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки. Теорет. основы хим. технологии, 33(4), 420–431.
17. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., БОЛДЫРЕВ С.А., АРСЕНЬЕВА О.П., ТАРНОВСКИЙ М.В., 2009, Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 при работе в зимнее время. Теорет. основы хим. технологии, 43(6), 665–676.
18. Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Ulyev L., Boldyryev S., Arsenyeva O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. Applied thermal engineering, 30(16), 2306–2314.

19. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš JJ., 2012, Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1447–1452.
20. Boldyryev S, Varbanov P.S, Nemet A, Klemeš J.J, Kapustenko P., 2014, Minimum heat transfer area for Total Site heat recovery. *Energy conversion and management*. 87, 1093–1097.
21. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009.– Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*. 18, 791–796.
22. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
23. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
24. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2014, Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
25. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chemical Engineering Transactions*, 12 (2007) 207–212.
26. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Harris J., Klochok O., Arsenyeva O., Kapustenko P., 2015, Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. *Heat Transfer Engineering*. 36(7-8): 741–749.
27. Tovazhnyansky L.L. and Kapustenko P.A., 1984, Intensification of heat and mass transfer in channels of plate condensers. *Chemical Engineering Communications*, 31(1–6), 351–366.
28. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131–138.
29. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Nagorna O.G., Perevertaylenko O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 16–22.
30. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Perevertaylenko O., Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2146–2152.
31. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y.– 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.

УДК 66.021.4

Кусаков С.К.

ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА НИЗЬКОГО ПОТЕНЦІАЛУ І ВИМОГИ ДО ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТАКОГО ТЕПЛА

Наведено аналіз можливих джерел тепла низького потенціалу серед яких визначено потоки після промислових процесів, стічні води та вентиляційне повітря будівель, тепло спалювання промислових та побутових відходів, тепло сонячних колекторів та геотермальне тепло. Утилізація цього тепла дозволяє в значній мірі скоротити потреби

в викопних паливах та викиди у навколишнє середовище вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, які утворюються при спаленні викопних палив. Сформульовано основні вимоги до теплообмінного обладнання для енергетично ефективної утилізації тепла низького потенціалу. Показано, що цим вимогам у повній мірі задовольняють сучасні компактні теплообмінні апарати, серед яких найбільш перспективними є пластинчаті теплообмінники.

Ключові слова: джерело тепла, низький температурний потенціал, утилізація тепла, енергетична ефективність, пластинчатий теплообмінник.

Кусаков С.К.

ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛО-ОБМЕННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТАКОГО ТЕПЛА

Приведен анализ возможных источников тепла низкого потенциала, среди которых определены потоки после промышленных процессов, сточные воды и вентиляционный воздух зданий, тепло сжигания промышленных и бытовых отходов, тепло солнечных коллекторов и геотермальное тепло. Утилизация такого тепла позволяет в значительной степени сократить потребность в ископаемых топливах и выбросы в окружающую среду углекислого газа и других вредных веществ, образующихся при сжигании ископаемых топлив. Сформулированы основные требования к теплообменному оборудованию для энергетически эффективной утилизации тепла низкого потенциала. Показано, что этим требованиям в полной мере удовлетворяют современные компактные теплообменные аппараты, среди которых наиболее перспективными являются пластинчатые теплообменники.

Ключевые слова: источник тепла, низкий температурный потенциал, утилизация тепла, энергетическая эффективность, пластинчатый теплообменник.

Kusakov S.K.

LOW POTENTIAL HEAT SOURCES AND REQUIREMENTS FOR HEAT EXCHANGE EQUIPMENT FOR ENERGY EFFICIENT UTILIZATION OF SUCH HEAT

The analysis of possible sources of low potential heat is presented. Among such sources are the streams after industrial processes, sewage and ventilation air of buildings, heat of combustion of industrial and household waste, heat of solar collectors and geothermal heat. The utilization of this heat can significantly reduce the fossil fuel demand and the environmental emissions of carbon dioxide and other harmful substances produced by the burning of fossil fuels. The basic requirements for heat exchange equipment for energy efficient utilization of low potential heat are formulated. It is shown that these requirements are fully satisfied by modern compact heat exchangers, among which the most promising are plate heat exchangers.

Keywords: heat source, low temperature potential, heat recovery, energy efficiency, plate heat exchanger.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті за наступними науковими напрямками:

- ✓ енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;
 - ✓ теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);
 - ✓ 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 кріогенне 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;
- 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;
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті на трьох мовах (українська, російська та англійська) повинні бути надруковані УДК, автори, назва і анотація.

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