

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ПРОМИСЛОВА ТЕПЛОТЕХНІКА

МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВО-ПРИКЛАДНИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

Том 40, № 4, 2018

Головний редактор – **Сисєжкін Ю.Ф.**

Редакційна колегія:

Долінський А.А. – почесний головний редактор
Авраменко А.О.
Бабак В.П. – заступник головного редактора
Басок Б.І.
Бондаренко Б.І.
Василенко С.М.
Горобець В.Г.
Клименко В.М.
Круковський П.Г.
Кудря С.О.
Письменний Є.М.
Фіалко Н.М.
Халатов А.А.
Шморгун В.В. – відповідальний секретар

Редакційна рада:

Акулич О.В. (Беларусь)
Балтренас П.Б. (Литва)
Ліграні П. (США)
Міховські М. (Болгарія)
Пошкас С. (Литва)
Піоро І.Л. (Канада)
Сайред Н. (Великобританія)

ЗМІСТ

ТЕПЛО- І МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ, ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУШІННЯ

**Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковський Ю.В.,
Меранова Н.О., Шараєвський І.Г., Піоро І.Л.**

CFD аналіз тепловіддачі надкритичної води в умовах
змішаної конвекції5

Тимошенко А.В., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М.

Аналіз течії та теплообміну в пограничному шарі
рідини з суттєвою залежністю в'язкості від
температури.....13

**Турчина Т.Я., Жукотський Е.К., Авдєєва Л.Ю.,
Макаренко А.А.**

Вплив мальтодекстрину як структуруючої добавки на
процес сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними
наноструктурами19

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

**Фіалко Н.М., Степанова А.И., Шевчук С.И.,
Сбродова Г.А.**

Комплексные методики оценки эффективности
и оптимизации теплоутилизационных систем25

Басок Б.І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В.

Нестационарный перенос теплоты в горизонтальном
грунтового теплообміннику34

Крамар В.Г.

Побудова графіка тривалості теплового навантаження
(графіка Росандера) для регіонів України41

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Долінський А.А., Ободович О.М., Сидоренко В.В.

Світовий та вітчизняний досвід виробництва
біоетанолу50

Драганов Б.Х., Демченко В.Г., Погорєлова Н.Д.

Метод профілювання вихрової спіральної камери58

Гелету́ха Г.Г., Же́lezна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І.

Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1.....62

Круковский П.Г., Метель М.А., Дейнеко А.И., Складченко Д.И.

Анализ и прогнозирование переноса радиоактивной пыли при эксплуатации нового безопасного конфайнмента ЧАЭС69

Радченко С.В.

Аналіз використання палива домогосподарствами та непромисловими споживачами75

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ВИМІРЮВАНЬ ТА МОНІТОРИНГУ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

Сімейко К.В.

Дослідження теплофізичних характеристик процесу піролізу метану в електротермічному псевдозрідженому шарі83

ПЕРЕЛІК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ В 2018 РОЦІ..... 91

ВИМОГИ ДО РУКОПИСІВ ЖУРНАЛУ "ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА" 93

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
APPLIED JOURNAL

Published 4 times a year

Founded in 1979

Volume 40, № 4, 2018

Editor in Chief – Yu. Snezhkin

Editorial Board Members:

A. Avramenko
V. Babak – Associated Editor
B. Basok
B. Bondarenko
A. Dolinsky – Honorable Editor
S. Vasylenko
V. Gorobec
V. Klimenko
P. Krukovsky
S. Kudrya
Ye. Pysmenny
N. Fialko
A. Khalatov
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

A. Akulich (Belarus)
P. Baltrenas (Lithuania)
P. Ligrani (USA)
M. Mitko (Bulgary)
P. Poskas (Lithuania)
I. Pioro (Canada)
N. Syred (United Kingdom)

CONTENTS

HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES AND POWER UNITS, THEORY AND PRACTICE OF DRYING

**Fialko N.M., Nosovskyi V.A., Sherenkovskiy Ju.V.,
Meranova N.O., Sharaevskiy I.G., Pioro I.L.**
CFD analysis of the heat transfer of supercritical water
under conditions of mixed convection5

Timoshchenko A.V., Dmitrenko N.P., Kovetska M.M.
Analysis of flow and heat transfer in the boundary layer
of fluid with essential dependence of viscosity from
temperature13

**Turchina T.Y., Zhukotskiy E.K., Avdeeva L.Y.,
Makarenko A.A.**
Influence of maltodextrin as a structural additive on the
process of drying drops of phospholipid suspensions.....19

DISTRICT AND INDUSTRIAL HEAT POWER, RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, ENERGY EFFICIENCY

Fialko M., Stepanova A., Shevchuk S., Sbrodova G.
Comprehensive methods of evaluation of efficiency and
optimization of heat-utilization systems.....25

Basok B.I., Davidenko B.V., Bozhko I.K., Moroz M.V.
Unsteady heat transfer in a horizontal ground heat
exchanger34

Kramar V.G.
Determination of load duration curve (Rossander graph)
for the regions of Ukraine41

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

Dolinskyi A.A., Obodovych O. M., Sydorenko V.V.
World's and domestic experience of bioethanol
production 50

Draganov B.Kh., Demchenko V.G., Pogorelova N.D.
Method of profiling of vortex valve chamber58

**Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.,
Bashtovyi A.I.**
Analysis of possibilities for the production and
consumption of agrobiomass briquettes in Ukraine.
Part I62

Krukovsky P.G., Metel M.A., Deineko A.I., Skliarenko D.I.
Analysis and prediction of radioactive dust transfer at the
new safe confinement of CHNPP operation69

Radchenko S.V.

Analysis of the use of fuel by households and non-industrial
consumers75

**THEORY AND PRACTICE MEASUREMENT AND
MONITORING IN HEAT POWER ENGINEERING**

Simeiko K.V.

Research thermal characteristics of the process of
pyrolysis of methane in the electrothermal fluidised bed ..83

LIST OF REASONS, PUBLISHED IN 2018..... 91

**REQUIREMENTS FOR MANUSCRIPT ARTICLES
OF THE MAGAZINE "THERMOPHYSICS AND
THERMAL POWER ENGINEERING" 93**

УДК 536.242

CFD АНАЛІЗ ТЕПЛОВІДДАЧІ НАДКРИТИЧНОЇ ВОДИ В УМОВАХ ЗМІШАНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Фіалко Н.М.^{1,2}, член-кореспондент НАН України, **Носовський А.В.²**, член-кореспондент НАН України, **Шеренковський Ю.В.¹**, канд. техн. наук, **Меранова Н.О.¹**, канд. техн. наук, **Шараєвський І.Г.²**, докт. техн. наук, **Піоро І.Л.³**, докт. техн. наук

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03057, Україна

² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Лисогорська, 12, м. Київ, 03028, Україна

³ Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.01>

Представлено результати комп'ютерного моделювання закономірностей теплообміну надкритичної води, пов'язані з впливом поля сил тяжіння.

Представлены результаты компьютерного моделирования закономерностей теплообмена сверхкритической воды, связанные с влиянием поля сил тяжести.

The results of computer modeling of heat transfer regularities of supercritical water, associated with the influence of the field of gravity, are presented.

Бібл. 15, рис. 5.

Ключові слова: надкритична вода, CFD моделювання, змішана конвекція.

D – внутрішній діаметр, м;
 G – масова швидкість, кг/(м²с);
 L – нагрівана довжина труби, м;
 P – тиск, МПа;
 q – густина теплового потоку на стінці труби, кВт/м²;
 r – радіальна координата, м;
 T – температура, °С;
 x – осьова координата, м;
 α – коефіцієнт тепловіддачі.

Нижні індекси і скорочення:

вх – вхідний;
 пк – псевдокритичний (pseudocritical);
 р – середньомасовий;
 ст – стінка;
 CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахункова гідродинаміка.

Вступ

При надкритичних тисках теплоносія в діапазоні температур, що включають псевдокритичну температуру, сили плавучості, як відомо, значно інтенсивніше впливають на теплообмін, ніж при параметрах, близьких до нормальних. Дана особливість теплообміну при надкритичних тисках пов'язана з екстремальною зміною густини теплоносія, що призводить до появи яскраво вираженого локального максимуму коефіцієнта об'ємного розширення поблизу псевдокритичної точки [1-4]. Вказане зумовлює актуальність проведення спеціальних досліджень теплообміну при надкритичних тисках, спрямованих на виявлення ролі термогравітації. При цьому як інструмент таких досліджень на особливу увагу заслуговує CFD моделювання [5-15].

Мета і постановка завдань досліджень

Метою роботи було встановлення закономірностей впливу термогравітації на теплообмін при висхідній течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах. Значна увага приділялася аналізу особливостей даного впливу, пов'язаних з деформацією радіальних профілів температури по довжині каналу, зниженням коефіцієнтів тепловіддачі α та рухом фронту псевдофа-

зового переходу. При цьому вказаний аналіз проводився при зміні у відносно широких межах густини теплового потоку на стінці труби.

Фізична постановка задачі, що розглядається, відповідає вісесиметричній задачі змішаної конвекції в умовах суттєвої залежності теплофізичних властивостей від температури. Для реалізації гідродинамічної стабілізації течії на вході в канал перед ним встановлювалась ненагрівана ділянка довжиною 1,2 м. Особливості математичної моделі досліджуваного процесу і методи комп'ютерного моделювання наведено в [11].

В табл. 1 подаються значення основних параметрів для різних варіантів CFD моделювання.

В усіх розрахункових варіантах внутрішній діаметр труби D і її довжини L були незмінними: $D = 10$ мм; $L = 4$ м.

Результати досліджень

На рис. 1 представлена зміна уздовж ділянки труби, що обігривається, величин коефіцієнта тепловіддачі α і температури стінки $T_{ст}$, отриманих з урахуванням і без урахування архимедових сил. Згідно з наведеними даними коефіцієнти тепловіддачі, що відповідають наявності вказаного врахування, є нижчими по всій

Табл. 1. Значення параметрів, які використовуються при CFD моделюванні

Варіант	G , кг/м ² с	q , кВт/м ²	$P_{\text{вх}}$, МПа	$T_{\text{вх}}$, °C
1	496	239	24	323
2	496	263	24	323
3	494	287	24,2	325
4	496	310	24	323

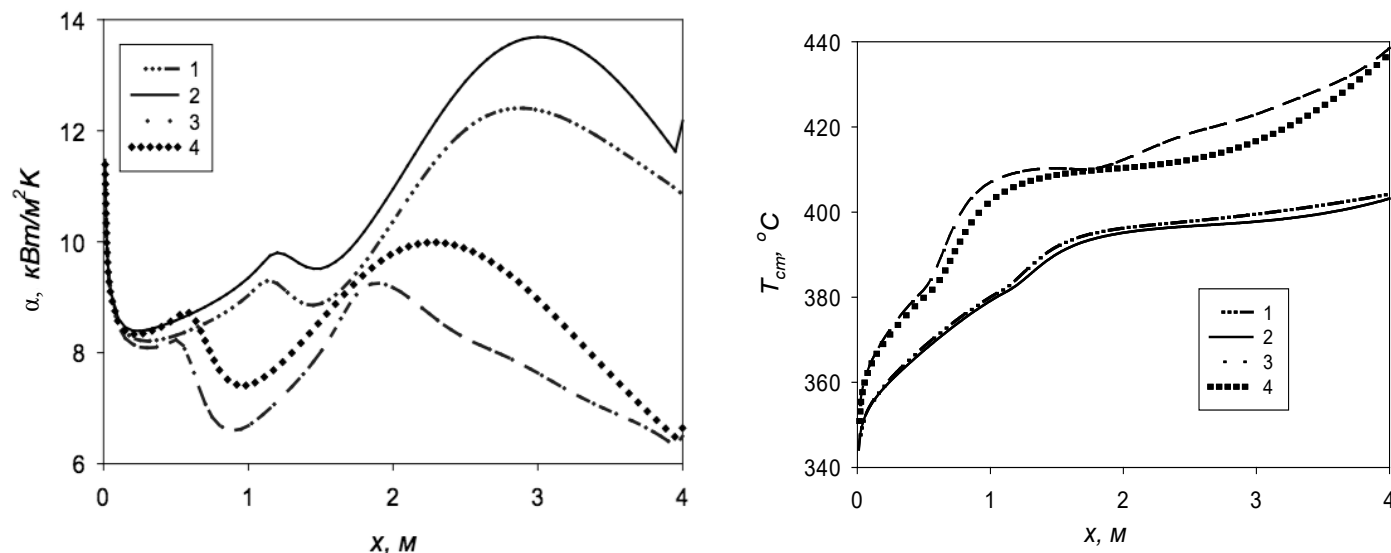


Рис. 1. Розподіл коефіцієнта тепловіддачі і температури стінки труби уздовж її осі з урахуванням (ліній 1, 3) і без урахування (ліній 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 та 4.

довжині труби. Причому відносні розбіжності в величинах α в разі наявності та відсутності врахування архимедових сил виявляються в цілому більш значними при високих q . Наприклад, ці розбіжності досягають 21 % при $q = 310$ кВт/м² і 11 % при $q = 239$ кВт/м².

Зниження тепловіддачі в разі дії сил плавучості пов'язано з деяким загасанням турбулентного переносу поблизу стінки, яке тим суттєвіше, чим вище густина підведеного теплового потоку q .

Характер зміни по довжині каналу величин коефіцієнта тепловіддачі, отриманих з урахуванням і без урахування сил плавучості, якісно аналогічний. Хоча в разі, коли береться до уваги дія зазначених сил, положення екстремумів на кривих $\alpha = f(x)$ дещо зміщується в область менших значень x .

Рисунок 2 ілюструє радіальні профілі температури за наявності і відсутності врахування сил плавучості. Як видно, для всіх представлених поперечних перерізів труби, окрім $x = 4,0$ м (де температури, що зіставляються, практично збігаються), має місце однаковий характер співвідношення температур для порівнюваних ситуацій. А саме, температури, що відповідають наявності врахування сил плавучості, виявляються вищими поблизу стінки труби і більш низькими поблизу її осі. При цьому відмінності порівнюваних температур по довжині труби

в цілому зростають, досягають максимуму і потім зменшуються, стаючи нехтовно малими. Підвищені рівні температур поблизу стінки труби зумовлені загасанням турбулентного переносу, пов'язаним з природною конвекцією. Зважаючи на це відведення теплоти до ядра потоку виявляється утрудненим і температури тут є більш низькими, ніж за відсутності природної конвекції.

Рисунок 3 ілюструє зміну коефіцієнта тепловіддачі α , температур $T_{\text{ст}}$ і $T_{\text{р}}$ по довжині труби для різних значень q (варіанти 1-4). Як видно, з підвищенням q суттєво знижуються коефіцієнти тепловіддачі, помітно зростають температури стінки труби при відносно невеликому збільшенні температури $T_{\text{р}}$. Так, значення коефіцієнта тепловіддачі можуть знижуватися в 1,7 рази при збільшенні теплового потоку, що підводиться, від 239 до 310 кВт/м². При цьому розбіжності за температурами стінки не перевищують 32 °C, а за температурами $T_{\text{р}}$ - 8 °C.

Профілі температури в різних поперечних перерізах каналу при різних значеннях густини теплового потоку, що підводиться, наведено на рис. 4. Як свідчать представлені дані, при відносно високих значеннях q ($q = 287$ кВт/м² і $q = 310$ кВт/м²) має місце складний характер впливу густини теплового потоку, що підводиться, на профілі температури по радіусу труби. Так,

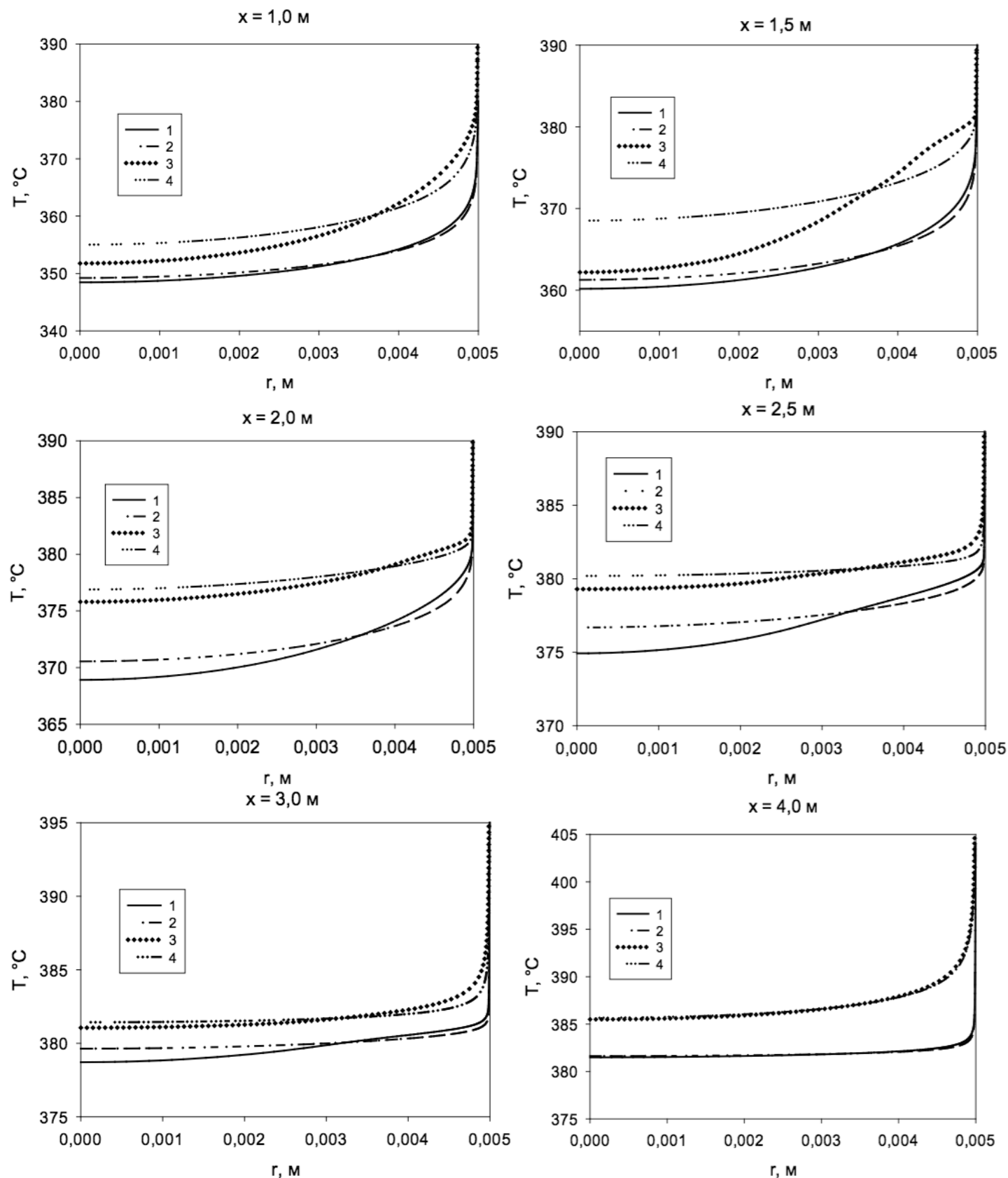


Рис. 2. Профілі температури в радіальному напрямку на різних відстані від вхідного перерізу труби з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 та 4.

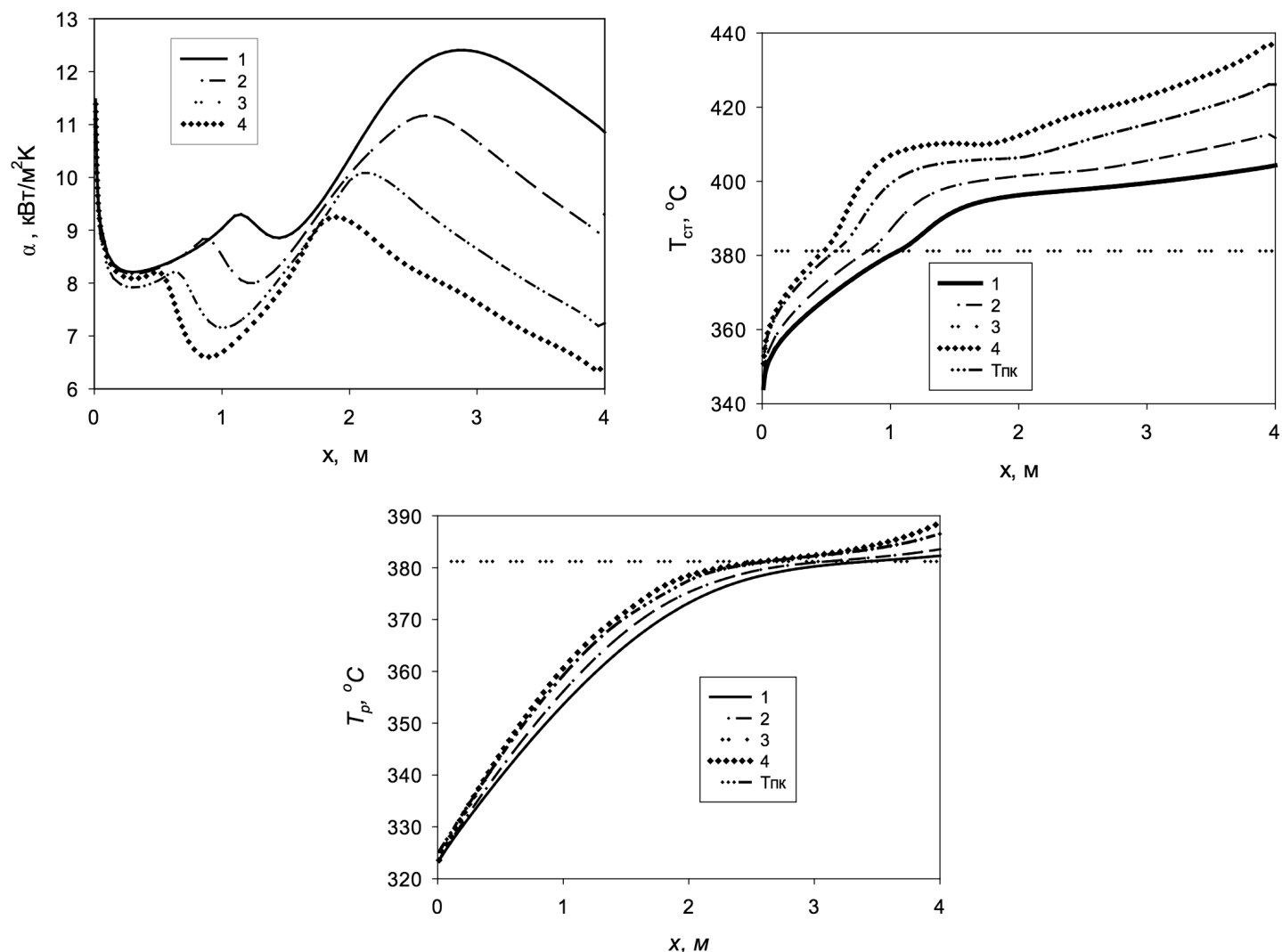


Рис. 3. Розподіл коефіцієнта тепловіддачі α , температури стінки труби $T_{ст}$ і температури флюїду T_p уздовж осі труби для варіантів розрахунку 1 - 4.

більшим значенням q в фіксованому поперечному перерізі труби можуть відповідати як вищі, так і нижчі температури поблизу стінки труби і на її осі в залежності від місця розташування даного перерізу. Для низьких же значень q ($q = 239 \text{ кВт/м}^2$ і $q = 263 \text{ кВт/м}^2$) у всіх поперечних перерізах каналу температури тим вищі, чим більше значення q . Описана картина співвідношення температур, що відповідають різним значенням густини теплового потоку, при відносно високих значеннях q , очевидно, пов'язана з зазначеним вище більш суттєвим проявом впливу сил плавучості за даних умов.

На рис. 5 наведено конфігурації фронту псевдофазового переходу для різних значень q за наявності і відсутності врахування архимедових сил. Даний фронт рухається від стінки труби і для всіх розглянутих ситуацій досягає її осі. При цьому, чим більше значення q , тим раніше фронт псевдофазового переходу досягає осі труби. Ця закономірність справедлива як у випадку

врахування сил плавучості, так і при його відсутності. При всіх величинах q значення поздовжньої координати, що відповідає положенню фронту на осі труби, виявляється меншим за відсутності врахування сил плавучості. Поблизу стінки труби картина руху фронту псевдофазового переходу з урахуванням і без урахування сил плавучості відрізняється від такої в ядрі потоку. А саме, якщо в ядрі потоку при врахуванні сил плавучості даний фронт рухається повільніше, то поблизу стінки навпаки швидше, ніж за відсутності даного врахування.

Висновки

1. На основі застосування FLUENT коду виконано моделювання змішаної конвекції при висхідній течії надкритичної води у вертикальних трубах та встановлено ефекти впливу термогравітації на характеристики теплообміну.

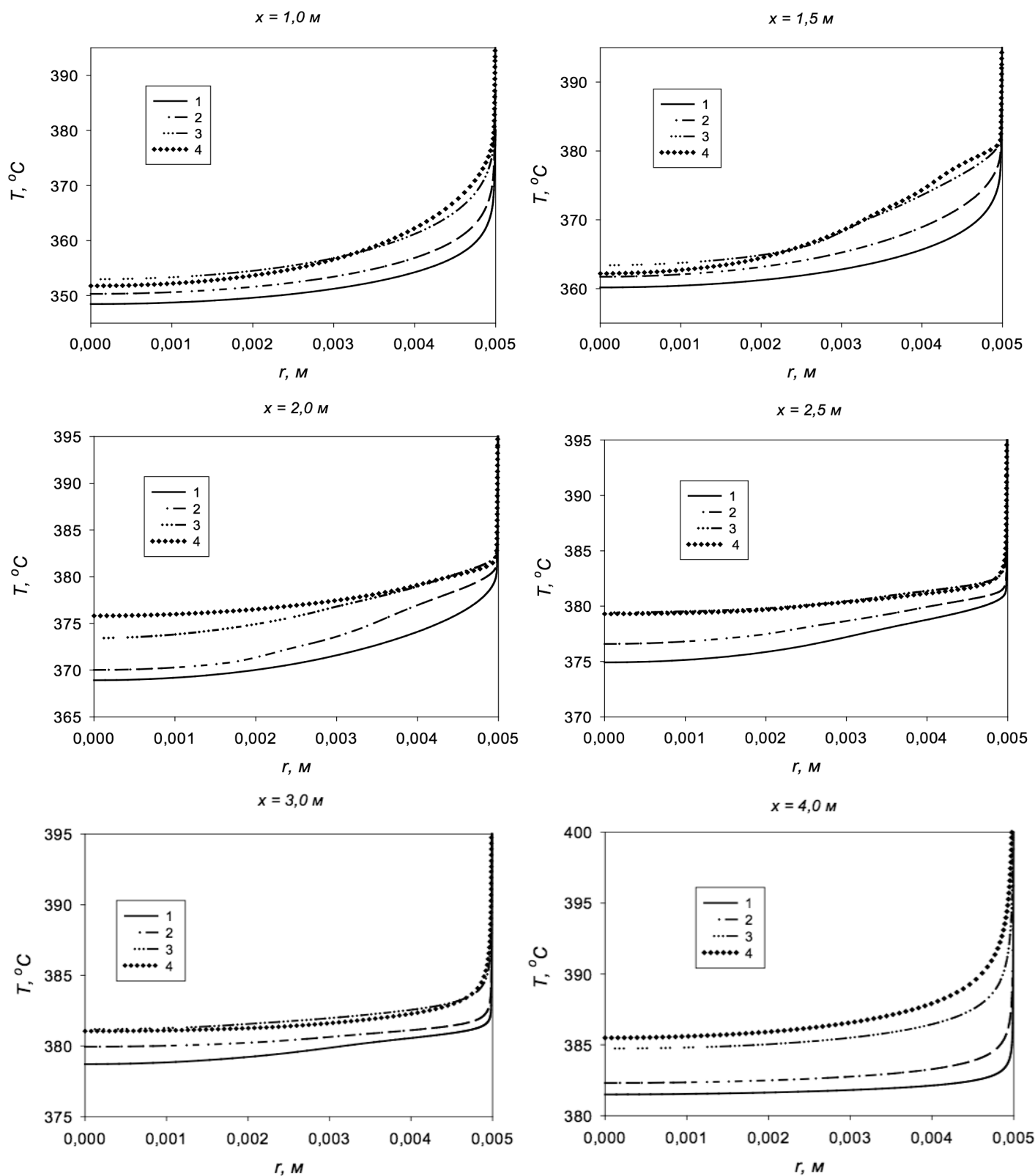


Рис. 4. Профілі температури в радіальному напрямку на різній відстані від вхідного перерізу труби для варіантів розрахунку 1-4.

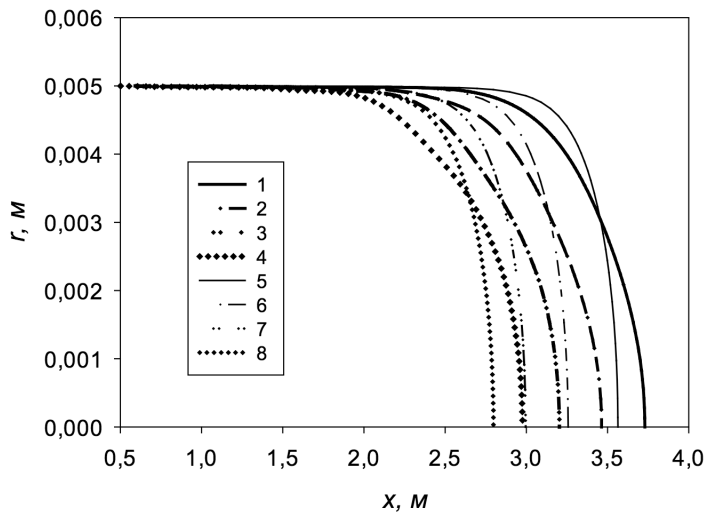


Рис. 5. Конфігурація руху фронту псевдофазового переходу, визначена за температурою T_{nk} з урахуванням (лінії 1-4) і без урахування (лінії 5-8) впливу сил плавучості для різних варіантів розрахунку: лінії 1, 5 – варіант 1; лінії 2, 6 – варіант 2; лінії 3, 7 – варіант 3; лінії 4, 8 – варіант 4.

2. Проведено зіставлення CFD передбачень за коефіцієнтами тепловіддачі і температурами внутрішньої поверхні стінки труби, отриманими з урахуванням і без урахування сил плавучості. Показано, зокрема, що коефіцієнти тепловіддачі, які відповідають відсутності даного урахування виявляються нижчими по всій довжині труби. При цьому відносні розбіжності величин α , які зіставляються, зростають з підвищенням значень підведеного теплового потоку.

3. Виконано аналіз впливу сил плавучості на конфігурацію радіальних профілів температури надкритичної води. Встановлено, що для всіх розглянутих значень q у всіх поперечних перерізах труби, крім перерізів, що знаходяться в безпосередній близькості до вихідного, температури, отримані з урахуванням сил плавучості, є вищими біля стінки труби і нижчими в ядрі потоку.

4. Отримано дані про закономірності руху фронту псевдофазового переходу в умовах наявності і відсутності врахування сил плавучості. Встановлено, що в ситуаціях, які зіставляються, швидкість руху даного фронту відрізняється поблизу стінки труби і в ядрі потоку: при врахуванні сил плавучості фронт псевдофазового переходу в ядрі потоку рухається повільніше, а поблизу стінки труби – навпаки швидше.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва: Наука. 1986. 191 с.

2. Pioro I., Duffey R., Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications. New York. NY. USA. ASME Press. 2007. 334 pages.

3. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешико С.А. CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. Промышленная теплотехника. 2018. №1. С.12-20.

4. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешико С.А., Власенко Т.С., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Стрижеус С.Н., Хміль Д.П. Особенности изменения теплофизических свойств сверхкритической воды при течении в круглых обогреваемых трубах. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28.№3. С.117 – 121.

5. Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I. CFD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

6. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г. Влияние теплового потока на стенке канала и давления воды на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника 2016. №5. С. 5-13.

7. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. Промышленная теплотехника. 2016. №3. С. 10-17.

8. Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I. CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

9. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г. Влияние массовой скорости потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника. 2016. №4. С. 5-13.

10. Farah A., Harvel G., Pioro I. Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa. Italy. Paper #118. 13p.

11. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Шараевський І.Г., Пиоро І.Л. Особенности течения надкритичной воды в условиях змешаной конвекции. Промислова теплотехніка. 2018. №3. С.12-19.

12. Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J. Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod

Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

13. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maisov N., Voitenko A., Pioro I. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

14. Shang Z. CFD Investigations of vertical rod bundles of supercritical water-cooled nuclear reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

15. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I. CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

CFD ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER OF SUPERCRITICAL WATER UNDER CONDITIONS OF MIXED CONVECTION

Fialko N.M.¹, Nosovskiy V.A.², Sherenkovskiy Ju.V.¹, Meranova N.O.¹, Sharaevskiy I.G.², Pioro I.L.³

¹ Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

² Institute of Nuclear Safety Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Lysogorskaya str., Kyiv, 03028, Ukraine

³ Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.01>

The results of computer modeling of heat exchange supercritical water, associated with the influence of gravity, are presented. CFD prediction data on heat transfer coefficients and temperatures of the inside surface of the tube wall, obtained with and without buoyancy, are presented.

An interpretation of these predictions, which is associated with the turbulent transfer extinction near the tube wall in the case of buoyancy forces, is given. The analysis of the influence of buoyancy forces on the configuration of the radial temperature profiles of supercritical water was performed. The data on the regularities of motion of the pseudo-phase transition front in the presence and absence of accounting for buoyancy forces have been obtained.

Reference 15, figure 5.

Keywords: supercritical water, CFD simulation, mixed convection.

1. Petukhov B.S., Polyakov A.F. Heat transfer with mixed turbulent convection. Moscow: Science. 1986. 191 p. (in Rus).

2. Pioro I., Duffey R., Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications. ASME Press. New York. NY. USA. 2007. 334 p.

3. Fialko N.M., Pioro I.L., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A. CFD Modeling of Heat Transfer under Flow of Supercritical

Parameters Water in Vertical Bare Tubes. Industrial Heat Engineering. 2018. № 1. P. 12-20. (in Ukr) <https://>

4. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Vlasenko T.S., Sharaevskiy I.G., Zimin L.B., Stryzheus S.N., Khmil D.P.* Specifics of Changes of the Thermophysical Properties of Supercritical Water at the Flow in Round Heated Tubes. Scientific Bulletin of UNFU. 2018. V.28. №3. P.117 - 121. (in Rus).

5. *Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I. C* FD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

6. *Fialko N.M., Pioro I.L., Sherenkovskiy Yu.V., Maison N.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G.* Effects of Heat Flux in the Channel Wall and Water Pressure on the Characteristics of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Industrial Heat Engineering. 2016. №5. P. 5-13. (in Rus). <https://>

7. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O.* Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Pressures. Industrial Heat Engineering. 2016. №3. P. 10-17. (in Rus).

<https://>

8. *Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I.* CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

9. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G.* Effect of Mass Flux on Flow Characteristic and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Industrial Heat Engineering. 2016. №4. P. 5-13. (in Rus). <https://>

10. *Farah A., Harvel G., Pioro I.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa. Italy. Paper #118. 13p.

11. *Fialko N.M., Nosovskiy A.V., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G., Pioro I.L.* Specifics of the flow of supercritical water under conditions of mixed convection. Industrial Heat Engineering. 2018. №3. P.12-19. (in Ukr). <https://>

12. *Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J.* Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

13. *Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Pioro I.* Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

14. *Shang Z.* CFD Investigations of Vertical Rod Bundles of Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

15. *Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I.* CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical Pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

Отримано 20.11.2018

Received 20.11.2018

УДК 536.244

АНАЛІЗ ТЕЧІЇ ТА ТЕПЛООБМІНУ В ПОГРАНИЧНОМУ ШАРІ РІДИНИ З СУТТЄВОЮ ЗАЛЕЖНІСТЮ В'ЯЗКОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

Тимошенко А.В., канд. техн. наук, Дмитренко Н.П., канд. техн. наук,
Ковецька М.М., канд. техн. наук.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.02>

Представлено результати досліджень теплообміну та гідродинаміки у пограничному шарі на плоскій пластині при течії рідини, в'язкість якої суттєво залежить від температури. Визначено умови формування малорухомого шару рідини біля стінки.

Представлены результаты исследования теплообмена и гидродинамики в пограничном слое на плоской пластине при течении жидкости, вязкость которой существенно зависит от температуры. Определены условия формирования малоподвижного слоя жидкости возле стенки.

The results of the study for heat transfer and fluid flow in the boundary layer over in case, when viscosity substantially depends on temperature, are presented. The conditions for the formation of a low-mobility fluid layer near the wall are determined.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: теплообмін, розплав базальту, пограничний шар, пластина, залежність в'язкості рідини від температури.

T – температура;
 U – швидкість;
 u – поздовжня компонента швидкості;
 v – поперечна компонента швидкості;
 x – поздовжня координата;
 y – поперечна координата;
 c_p – теплоємність;
 ρ – густина;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості;
 λ – коефіцієнт теплопровідності;
 q – інфінітезимальний генератор.

Нижні індекси:

w – умови на стінці;
 ∞ – умови на зовнішній границі пограничного шару.

Вступ

Широке впровадження нової екологічно безпечної, довговічної і пожежостійкої теплової ізоляції на основі базальтового супертонкого волокна (БСТВ) в значній мірі пов'язане з системною інтенсифікацією технологічних процесів, яка складає основу підвищення їх енергетичної ефективності. Завдяки їй можна буде в півтора – два рази зменшити витрати природного газу і електроенергії при виробництві теплоізоляції, а також досягнути зниження витрат енергоносіїв на опалення будівель та споруд, шляхом істотного підвищення їх теплоутримуючих властивостей.

На сьогодні переважна частина теплоізоляційних матеріалів є цілком синтетичними (полімерними та полімеровмісними), або містять у своєму складі зв'язуючі речовини синтетичного походження [1]. Щодо протипожежних вимог, то навіть винесення теплоізоляційного шару назовні не є ефективним і призводить до істотного зниження пожежостійкості споруд, особливо багатоповерхових. Саме через теплоізоляційні матеріали пожежі приймають катастрофічний характер і супроводжуються загибеллю людей, насамперед через отруєння токсичними газоподібними речовинами, які виділяються з теплоізоляційних матеріалів, навіть якщо

вони і не горять, а лише піддаються нагріванню. При цьому для отруєння людей газами достатньо присутності у складі теплоізоляційних матеріалів лише синтетичних зв'язуючих речовин. Останнім часом частішали випадки потужних пожеж у нових багатоповерхових спорудах [2]. Водночас існують теплоізоляційні матеріали, які здатні при їх застосуванні у спорудах, істотно підвищити вогнестійкість споруд. Саме до таких матеріалів належить теплоізоляція на основі надтонкого базальтового волокна.

Властивості українських базальтів виключно перспективні для вироблення надтонкого базальтового волокна через: а) оптимальний мінералогічний склад; б) низьку (відносно іншої базальтової сировини) температуру плавлення; в) широкий температурний діапазон меж кристалізації базальтового скла. Крім того, базальтові кар'єри присутні у різних регіонах України [3, 4].

Дуплекс-технологія виготовлення базальтового волокна включає дві стадії термообробки сировини. Перша стадія відповідає за підігрів, плавлення, дегазацію та гомогенізацію розплаву. При цьому викопна порода, що характеризується певним хімічним та мінералогічним складом, перетворюється в аморфний розплав. Процес вважається тим більш довершеним, чим більш

однорідні та ізотропні кінцеві властивості розплаву. Значний вплив на кінцеві властивості розплаву мають умови течії та теплообміну в ванні та фідері плавильної печі.

Мета роботи полягає в визначенні впливу в'язкості розплаву на течію та теплообмін в пограничному шарі на плоскій поверхні та умов формування малорухомого шару рідини поблизу стінки.

Розглядається теплообмін при течії розплаву базальту в ламінарному пограничному шарі на плоскій поверхні. В'язкість розплаву базальту є нелінійною функцією, що суттєво залежить від температури [5] (рис.1).

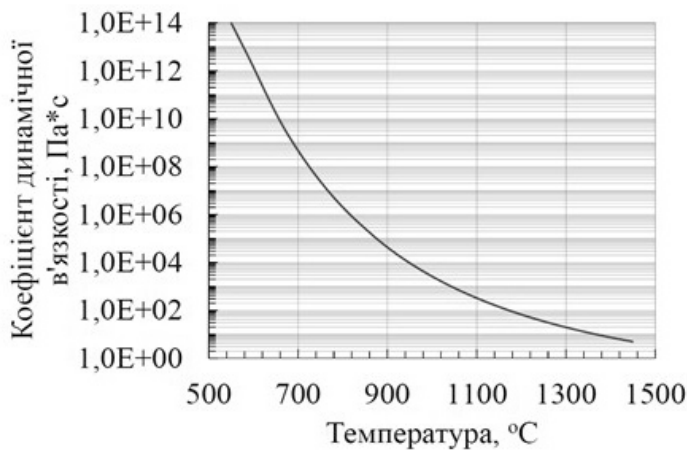


Рис. 1. Залежність коефіцієнту динамічної в'язкості від температури для скла з базальту родовища Іванова Долина.

Математична модель

Розглядається стаціонарна задача течії і теплообміну в пограничному шарі рідини на плоскій поверхні. Вихідна система рівнянь гідродинаміки та теплообміну в пограничному шарі на плоскій пластині в двовірному наближенні [6]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Рівняння (1) – (3) аналізуються при наступних граничних умовах

$$u = v = 0, \quad T = T_w \quad \text{в } y = 0 \quad (4)$$

$$u = U_\infty, \quad T = T_\infty \quad \text{в } y \rightarrow \infty \quad (5)$$

Для вирішення системи диференціальних рівнянь з частковими похідними (1) – (3), перетворимо їх до звичайних диференціальних рівнянь. З цією метою застосуємо аналіз симетрій (аналіз груп Лі) [7]. Алгоритм використання аналізу симетрій для задач тепломасообміну та гідродинаміки наведено в [8-12].

Симетрії системи (1) – (3) можуть бути описані інфінітезимальним генератором

$$q = \xi_1 \frac{\partial}{\partial x} + \xi_2 \frac{\partial}{\partial y} + \phi_1 \frac{\partial}{\partial u} + \phi_2 \frac{\partial}{\partial v} + \phi_3 \frac{\partial}{\partial T} + \zeta_1 \frac{\partial}{\partial \rho} + \zeta_2 \frac{\partial}{\partial \mu} + \zeta_3 \frac{\partial}{\partial c_p} + \zeta_4 \frac{\partial}{\partial \lambda}, \quad (6)$$

де вирази для коефіцієнтів $\xi_1, \xi_2, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ подаються нижче.

Для знаходження симетрій системи диференціальних рівнянь в часткових похідних (1) – (3) повинна застосовуватись наступна умова

$$pr^{(2)}q(\Delta) = 0, \quad (7)$$

де $pr^{(2)}q(\Delta)$ друге продовження інфінітезимального генератора (6), символ Δ визначає систему диференціальних рівнянь в часткових похідних (1) – (3).

Друге продовження інфінітезимального генератора q (6) визначається у відповідності з наступним виразом

$$pr^{(2)}q = q + \phi_1^x \frac{\partial}{\partial u_x} + \phi_1^y \frac{\partial}{\partial u_y} + \phi_1^{yy} \frac{\partial}{\partial u_{yy}} + \phi_2^y \frac{\partial}{\partial v_y} + \phi_3^x \frac{\partial}{\partial T_x} + \phi_3^y \frac{\partial}{\partial T_y} + \phi_3^{yy} \frac{\partial}{\partial T_{yy}}, \quad (8)$$

де індекси при u, v, T являють собою часткові похідні по відповідним змінним. Коефіцієнти $\phi_1^x, \phi_1^y, \phi_1^{yy}, \phi_2^y, \phi_3^x, \phi_3^y, \phi_3^{yy}$ являють собою функції від $\xi_1, \xi_2, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, u, v, T$ та їх похідних по x, y . Застосування оператора $pr^{(2)}q$ до кожного рівняння системи (1) – (3) (у відповідності з умовою (7)) приводить до двох рівнянь. Ці рівняння містять одночлени з різними комбінаціями похідних по u, v, T . Далі, коефіцієнти при одночленах, які містять тотожні комбінації похідних по u, v, T прирівнюються. В результаті одержуємо систему диференціальних рівнянь в часткових похідних від $\xi_1, \xi_2, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$.

Рішення цієї системи складається з двох симетрій (двох підалгебр Лі). Після подальших перетворень алгебр Лі система (1) – (3) може бути остаточно представлена, як

$$q_1 = \frac{\partial}{\partial x} + F_1(x) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{dF_1(x)}{dx} u \frac{\partial}{\partial v}, \quad (9)$$

$$q_2 = x \frac{\partial}{\partial x} + \left(\frac{1}{2} y + F_2(x) \right) \frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{dF_2(x)}{dx} u - \frac{1}{2} v \right) \frac{\partial}{\partial v}, \quad (10)$$

де $F_1(x), F_2(x)$ – довільні гладкі функції.

Найбільш зручною симетрією для одержання автомодельних змінних є друга підалгебра Лі q_2 (10), оскільки вона не містить перетворень по u , T , ρ , μ , c_p , λ . Крім того, симетрію (10) слід скорегувати з урахуванням функціональної залежності $\mu = \mu(T)$, а одержані автомодельні функції цих змінних не містять параметричних змінних, наприклад функції координати x . Це також відноситься до автомодельних функцій u та T . Єдина автомодельна функція, що містить параметричну змінну, це $v(x, y)$, оскільки $v(x, y)$ входить в інфінітезимальний генератор (10). Можна знайти форму автомодельної функції V з рівняння (10), використовуючи наступне співвідношення

$$x \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{2} v \frac{\partial V}{\partial v} = 0. \quad (11)$$

Рішення рівняння (11) дає

$$v \sim \frac{v(\eta)}{\sqrt{x}}, \quad (12)$$

де η – автомодельна змінна, що також може бути знайдена з рівняння (10) використовуючи вираз

$$x \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{2} y \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0. \quad (13)$$

Інтегрування рівняння (13) призводить до наступного рішення

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_{\infty} \rho}{\mu_{\infty} x}}. \quad (14)$$

Параметр $\left(\frac{U_{\infty} \rho}{\mu_{\infty}}\right)$ в рівнянні (14) застосовується тільки для параметризації автомодельної змінної. Точний вигляд функціональної залежності (12) одержується з рівняння нерозривності та наводиться нижче. Аналіз автомодельних форм проведено при умові $F_2(x) = 0$. Функція $F_2(x)$ описує принцип перенесення Прандтля [13] та може бути використана при аналізі потоку над поверхнею з змінною геометрією. Оскільки поверхня, що розглядається плоска, то значення $F_2(x)$ дорівнює 0.

При рішенні задачі густина середовища приймається постійною. Швидкість u , в автомодельних змінних, представляємо у вигляді

$$u = U_{\infty} f'(\eta). \quad (15)$$

Похідна $f'(\eta)$ використовується для зручності інтегрування рівняння нерозривності (1), при визначенні автомодельної форми для швидкості v . Після інтегрування одержуємо залежність для швидкості v у вигляді

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_{\infty} \cdot \mu_{\infty}}{\rho \cdot x}} (f'(\eta) \cdot \eta - f(\eta)). \quad (16)$$

Вводимо автомодельну функцію для температури

$$T = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_w) \cdot \Theta(\eta) \quad (17)$$

та підставляємо рівняння (14) – (17) в рівняння (1) – (3), і одержуємо систему звичайних диференціальних рівнянь в автомодельній формі

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot f(\eta) \cdot f''(\eta) + M'[\Theta(\eta)] \cdot \Theta'(\eta) \cdot f''(\eta) + \\ & + M[\Theta(\eta)] \cdot f^{(3)}(\eta) = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} \cdot Pr_{\infty} \cdot f(\eta) \cdot \Theta'(\eta) + \Theta''(\eta) = 0. \quad (19)$$

Залежність динамічного коефіцієнта в'язкості рідини від температури описується рівнянням

$$\mu(T) = 3,83 \cdot 10^{-3} \cdot e^{\frac{2,41 \cdot 10^6}{(T)^7}}. \quad (20)$$

В автомодельній формі рівняння (20) представляємо у вигляді

$$\mu(\Theta(\eta)) = \mu_{\infty} \cdot M[\Theta(\eta)], \quad (21)$$

де μ_{∞} – в'язкість рідини за межами пограничного шару.

Система рівнянь (18), (19) вирішується при наступних граничних умовах

$$f(0) = 0, \quad f'(0) = 0, \quad \Theta(0) = 1 \quad \text{при} \quad \eta = 0 \quad (22)$$

$$f'(\infty) = 1, \quad \Theta(\infty) = 0 \quad \text{при} \quad \eta \rightarrow \infty \quad (23)$$

Результати досліджень

На основі системи рівнянь (18), (19) з граничними умовами (22), (23) виконано чисельне моделювання руху рідини та теплообміну в граничному шарі над плоскою поверхнею в широкому діапазоні зміни параметрів μ та Θ . Чисельні рішення одержувались за допомогою програмних продуктів MAPLE та Mathematica. На рисунках 2, 3 представлено результати розрахунків безрозмірного профілю швидкості в пограничному шарі в залежності від різниці між температурою стінки і температурою рідини на зовнішній границі шару. Значна залежність в'язкості рідини від температури істотно впливає на розподіл швидкості в пограничному шарі. Зі збільшенням різниці температур (зменшенням температури стінки) збільшується пристінна область з нульовим значенням швидкості. Більш детально визначення границі малорухомої області показано на рис. 3. Таким чином можливо визначити граничне значення температури стінки при заданій температурі рідини на границі

пограничного шару, нижче якої формується малорухо- мий шар рідини.

На рис. 4 представлено безрозмірні профілі тем- ператури рідини в пограничному шарі при постійній температурі рідини на його зовнішній границі $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ і для різних значень температури стінки.

Зі зменшенням температури стінки збільшується товщина температурного пограничного шару і профіль температури наближається до лінійного.

Встановлено, що для умов течії близьких до ізо- термічних, друга похідна автомодельної функції на стін-

ці відрізняється від свого значення при ізотермічному русі не більше ніж на 1%, результати добре узгоджу- ються з відомим рішенням Блазіуса. В умовах неізо- термічної течії, величина другої похідної автомодель- ної функції на стінці зменшується і наближається до 0 (рис. 5).

Приймаємо, що зростання малорухливого шару рі- дини (гарнісажного шару) починається при температурі на стінці, для якої величина другої похідної автомо- дельної функції становить 1% від своєї величини для ізотермічної течії. Відповідно до умов дослідження критична температура на стінці відповідає величині $1088\text{ }^{\circ}\text{C}$.

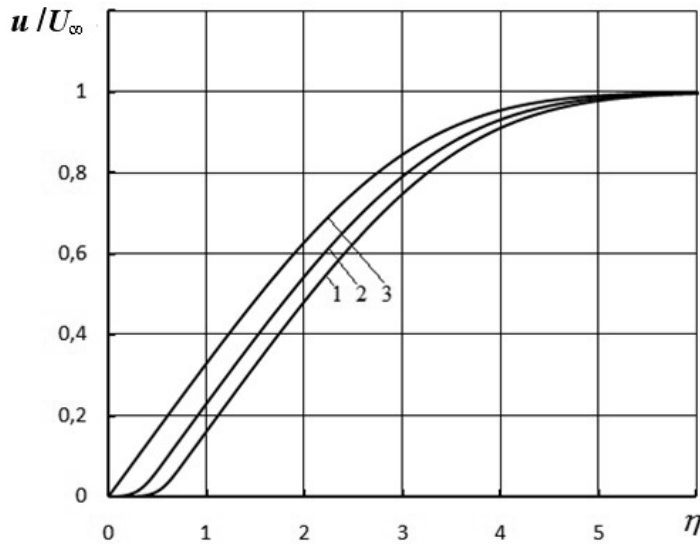


Рис. 2. Розподіл швидкості в пограничному шарі при: 1 – $t_w = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $1449\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\infty} = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Pr = 5180$.

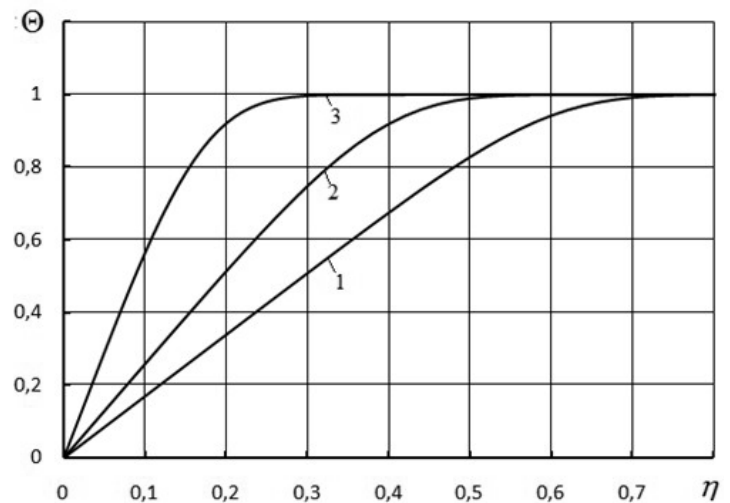


Рис. 4. Розподіл температури в пограничному шарі при: 1 – $t_w = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $1449\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\infty} = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Pr = 5180$.

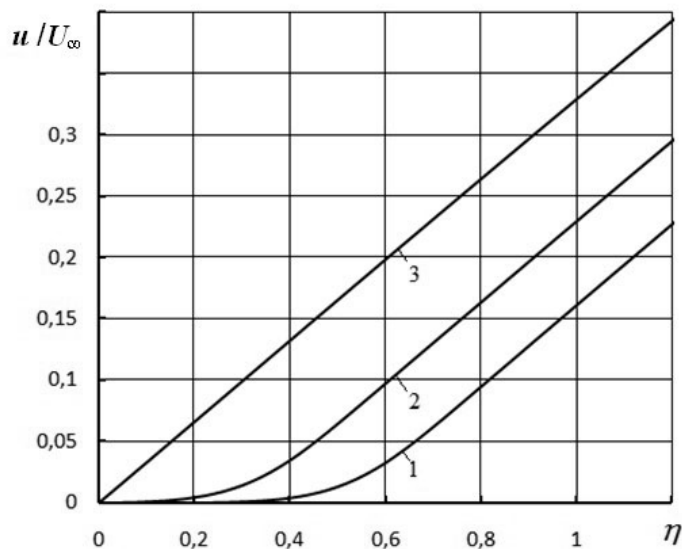


Рис. 3. Розподіл швидкості в пограничному шарі при: 1 – $t_w = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $1449\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\infty} = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$; $Pr = 5180$.

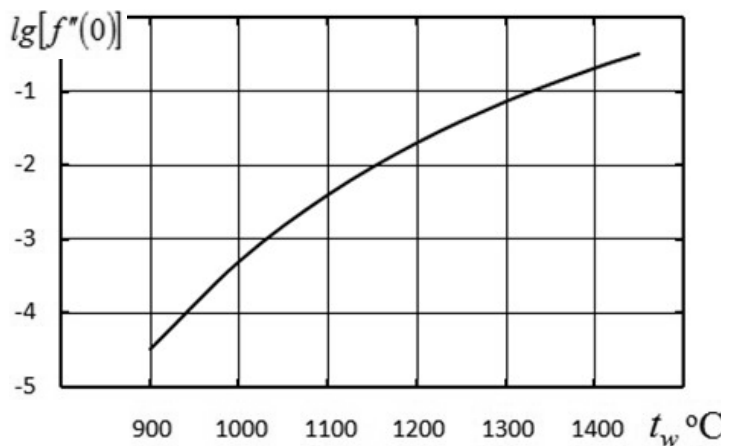


Рис. 5. Залежність другої похідної автомодельної функції від температури на стінці.

Висновки

Розглянуто теплообмін при течії розплаву базальту в ламінарному пограничному шарі на плоскій поверхні. Розроблено математичну модель гідродинаміки і теплообміну при течії рідини з сильною залежністю надвисокої в'язкості від температури.

На основі розробленої математичної моделі одержано нові закономірності течії і теплообміну аномально високов'язкої рідини при температурах 900...1450 °С. Визначено умови формування малорухомого шару рідини біля твердої поверхні. Встановлено вплив величини малорухомого шару рідини на розподіл температури в пограничному шарі розплаву.

Отримані результати дозволяють скорегувати температурні режими в плавильній печі і удосконалити процес виготовлення надтонких базальтових волокон.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Теплоизоляция*. Материалы, конструкции, технологии: Справочное пособие / Гл. ред. С.М. Кочергин. – М.: Стройинформ. – 2008. – 440 с.
2. *Information on* <http://www.bbc.com/russian/news-40366259>
3. *Минерально-сырьевая база горных пород Украины для производства волокон*. Аналитический обзор / В.И. Трефилов, М.Ф. Махова, Д.Д. Джигирис [и др.] // Промышленность строительных материалов. Серия 6. Промышленность полимерных, мягких кровельных и теплоизоляционных строительных материалов. – 1992. – Выпуск 2. – С. 88.
4. *Джигирис Д.Д., Махова М.Ф.* Основы производства базальтовых волокон и изделий. – М.: Теплоэнергетик. – 2002. – 416 с.
5. *Полевой П.П.* Теплообменные процессы при получении волокна раздувом минеральных нитей высокотемпературными газовыми потоками. Дисс. ... канд. техн. Наук. Киев. – 1982. – 193 с.
6. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука. – 1969. – 387 с.
7. *Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В.* Групповые методы в теплофизике. – Киев: Наукова думка. – 2003. – 484 с.
8. *Avramenko A. A., Blinov D. G., and Shevchuk I. V.* (2011). Self-similar analysis of fluid flow and heat-mass transfer of nanofluids in boundary layer. *PHYSICS OF FLUIDS* 23, 082002 (2011).
9. *Avramenko A. A., Kobzar S.G., Shevchuk I.V., Kuznetsov A.V., Iwanisov L.T.* Symmetry of turbulent boundary layer flows: Investigation of different eddy viscosity models // *Acta Mechanica*. – 2001. – 151, N 1-2. – P.1-14.
10. *Avramenko A. A., Blinov D. G., Shevchuk I. V., Kuznetsov A. V.* Symmetry analysis and self-similar forms of fluid flow and heat-mass transfer in turbulent boundary layer flow of a nanofluid // *Phys. Fluids*. – 2012. – 24. – P. 092003-1 – 092003-20.
11. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Abdallah S., Blinov D. G., Harmandd S., Tyrinov A. I.* Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach // *Journal of Molecular Liquids*. – 2016. – 223. – P. 156 – 164.
12. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Abdallah S., Blinov D. G., Tyrinov A. I.* Self-similar analysis of fluid flow, heat, and mass transfer at orthogonal nanofluid impingement onto a flat surface // *Phys. Fluids*. – 2017. – 29. – P. 052005-1 – 052005-11.
13. *Maxwell J. C.* Treatise on Electricity and Magnetism (Oxford University Press, London, 1904).

ANALYSIS OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN THE BOUNDARY LAYER OF FLUID WITH ESSENTIAL DEPENDENCE OF VISCOSITY FROM TEMPERATURE

Timoshchenko A.V., Dmitrenko N.P., Kovetska M.M.

*Institute of Engineering Thermophysics of National
Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv,
03680, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.02>

The introduction of new environmentally safe, durable and fire-resistant thermal insulation based on basalt fiber requires the improvement of technological processes for the production of basalt filaments in order to increase their energy efficiency. The quality of basalt fiber significantly depends on the properties of the basalt melt in the process. The process is considered to be more perfect than the more homogeneous and isotropic final properties of the melt. The conditions of flow and heat transfer in the bath and feeder of the melting furnace have a significant impact on the final properties of the melt.

The paper presents the results of studies of heat transfer in the boundary layer on a flat plate with the flow of a liquid, the viscosity of which depends significantly on temperature. The system of differential equations, which describes the steady-state flow regime, is solved using symmetry analysis (analysis of Lie groups).

On the basis of the developed mathematical model, new results were obtained which characterize the regularities of the flow and heat exchange of a highly viscous fluid in the range of temperature variations from 900 to 1450 °C. The conditions for the formation of a low-mobility layer of liquid near a solid surface are determined. The influence of the value of a low-mobility fluid layer on the temperature distribution in the boundary layer of basalt melt is established.

The results obtained allow us to adjust the temperature regimes in the melting furnace and improve the process of manufacturing ultrathin basalt threads.

References 13, Figures 5.

Key words: heat exchange, basalt melts, boundary layer, plate, dependence of the viscosity of the liquid on temperature.

1. Kochergin S.M. *Teploizolyaciya*, [Heat insulation], Materialy, konstrukcii, tekhnologii: Spravochnoe posobie M.: Strojinform. 2008, 440 p. (in Rus.)

2. *Information* on <http://www.bbc.com/russian/news-40366259>

3. Trefilov V.I., Mahova M.F., Dzhigiris D.D. Mineral'no-syr'evaya baza gornyh porod Ukrainy dlya proizvodstva volokon. Analiticheskij obzor, [Mineral and raw material base of rocks of Ukraine for the production of fibers. Analytical review], Promyshlennost' stroitel'nyh materialov. Seriya 6. [Industry building materials. Series 6], 1992. №6. 88p. (in Rus.)

4. Mahova M.F., Dzhigiris D.D. Osnovy proizvodstva bazal'tovyh volokon i izdelij, [Basics of basalt fiber production and products]. M.: Teploehnergetik, 2002. 416 p. (in Rus.)

5. Polevoj P.P. Teploobmennye processy pri poluchenii volokna razduvom mineral'nyh nitej vysokotemperaturnymi gazovymi potokami, [Heat transfer processes in the production of fiber blown mineral fibers by high-temperature gas flows] Kiev: Diss. kand. Nauk, 1982. – 193 p. (in Rus.)

6. Shlihting G. Teoriya pogranichnogo sloya, [The theory Boundary layer] – M.: Nauka, 1969. 387 p. (in Rus.)

7. Avramenko A.A., Basok B.I., Kuznetsov A.V. Gruppy metody v teplofizike, [Group methods in thermal physics]. Kiev. Naukova dumka, 2003. 484 p. (in Rus.)

8. Avramenko A. A., Blinov D. G., and Shevchuk I. V. Self-similar analysis of fluid flow and heat-mass transfer of nanofluids in boundary layer. Physics of fluids. 2011. V. 23(8): 082002.

9. Avramenko A. A., Kobzar S.G., Shevchuk I.V., Kuznetsov A.V., Iwanisov L.T. Symmetry of turbulent boundary-layer flows: Investigation of different eddy viscosity models. Acta Mechanica. 2001. V.151(1-2). P.1 – 14.

10. Avramenko A. A., Blinov D. G., Shevchuk I. V., Kuznetsov A. V. Symmetry analysis and self-similar forms of fluid flow and heat-mass transfer in turbulent boundary layer flow of a nanofluid. Phys. Fluids. 2012. V. 24. P. 092003-1 – 092003-20.

11. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Abdallah S., Blinov D. G., Harmandd S., Tyrinov A. I. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. Journal of Molecular Liquids. 2016. V. 223. P. 156 – 164.

12. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Abdallah S., Blinov D. G., Tyrinov A. I. Self-similar analysis of fluid flow, heat, and mass transfer at orthogonal nanofluid impingement onto a flat surface. Phys. Fluids. 2017. V. 29. P. 052005-1 – 052005-11.

13. Maxwell J. C. Treatise on Electricity and Magnetism (Oxford University Press, London, 1904).

Отримано 30.10.2018

Received 30.10.2018

УДК 66.047

ВПЛИВ МАЛЬТОДЕКСТРИНУ ЯК СТРУКТУРУЮЧОЇ ДОБАВКИ НА ПРОЦЕС СУШІННЯ КРАПЕЛЬ ЕМУЛЬСІЙ З ФОСФОЛІПІДНИМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

Турчина Т.Я., канд. техн. наук, Жукотський Е.К., Авдєєва Л.Ю., докт. техн. наук,
Макаренко А.А., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.03>

Вивчено вплив мальтодекстину як структуруючої добавки на процес сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними наноструктурами та фізичний стан висушених часток.

Изучено влияние мальтодекстрина как структурирующей добавки на процесс сушки капель эмульсий с фосфолипидными наноструктурами и физическое состояние высушенных частиц.

The influence of maltodextrin as a structural additive on the process of drying droplets of emulsions with phospholipid nanostructures and physical state of dried particles was studied.

Бібл. 9, рис. 3.

Ключові слова: сушіння, крапля, термограма, кінограма, емульсія фосфоліпідів, мальтодекстрин, термопластичність.

C – вміст сухих речовин;

T – температура;

t – час;

δ – діаметр краплі;

кр.2 – друга критична крапка;

кр.3 – третя критична крапка.

Нижні індекси:

п – теплоносій - повітря;

дос – досушування;

к – крапля;

кін – кінцевий;

кірк – кіркоутворення;

о – вихідний, початковий;

заг – загальний.

Створення прогресивних технологій виробництва сухої форми продуктів та препаратів з фосфоліпідними наноструктурами методом розпилювального сушіння є на сьогодні **актуальним**, оскільки дисперсні наноматеріали як засоби локальної доставки біологічно активних речовин та лікувальних препаратів поступово стають незамінними для фармацевтики, медицини, косметології та ін. галузей промисловості..

Емульсії з фосфоліпідними наноструктурами, отримані після ДІВЕ-обробки у роторно-пульсаційному апараті, представляють собою складні гетерогенні дисперсні системи [1-3], які при сушінні проявляють термопластичні та адгезійні властивості. Частинки дисперсної фази цих систем мають розмір від 10 нм до 1,0 мкм і володіють надзвичайно великою сумарною площею поверхні. Інтенсивний розвиток площі поверхні обумовлює додаткові особливості утвореної дисперсної системи. Їх сушіння методом розпилювання призводить до відкладень в сушильній камері, високим втратам продукту і низькій якості порошку. Покращити умови сушіння таких матеріалів можливо за рахунок використання структуруючих добавок [4-7].

Для таких складних матеріалів як емульсії з фосфоліпідними наноструктурами забезпечення максимальної ефективності процесу розпилювального сушіння та високої якості порошкового продукту можливе за умов, коли:

- в момент відриву від кромки дискового розпилювача крапля набуває сферичної форми;
- на її поверхні в процесі зневоднення утворюється кірочка з достатньо міцною та паропровідною структурою, здатною забезпечити не тільки миттєве її висушування, а й збереження її сферичної форми при сепарації, вивантаженні та пакуванні;
- внутрішня її структура набуває максимальної щільності, монолітності, що сприяє збільшенню насипної густини і, за рахунок цього, покращенню сипкотності порошку і своєчасному видаленню його з зони термічної дії в камері.

Дослідження процесу сушіння на системі “крапля – парогазове середовище” з приділенням особливої уваги морфології висушених часток та їх фізичному стану, у т.ч. наявності термопластичних і адгезійних властивостей, дозволяють вирішити питання складних реологічних властивостей матеріалу як об’єкту розпилювального сушіння та визначити шляхи покращення його структуроутворюючих та вологостійких властивостей при зневодненні та структурно-механічних характеристик порошку.

Відомі дані про ефективність використання різних структуруючих добавок (глюкози, соєвого ізоляту, гідролізованого білку та ін.) при отриманні сухих препаратів з ліпідними наноструктурами [5-7]. Досліджені авторами добавки по різному проявили себе

при сушінні емульсій фосфоліпідів, що вимагає продовження досліджень для виявлення більш ефективної для даної дисперсної системи структуроутворюючої добавки. Важливим питанням також є визначення ролі внесених добавок в процесах структуроутворення і зміну властивостей матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння [8].

Мета роботи полягала у дослідженні впливу мальтодекстрину на процес сушіння крапель емульсій фосфоліпідів (лецитину) та міцнісні властивості висушених частинок для підвищення структуроутворюючих властивостей складної гетерогенної системи при розпилювальному сушінні і визначення раціональних теплотехнологічних параметрів для одержання порошкової форми препаратів із заданими характеристиками.

В дослідженнях використовувались емульсії фосфоліпідів (далі ЕФЛ) з мальтодекстрином з вмістом сухих речовин від 10% до 40% у різному співвідношенні лецитину та мальтодекстрину.

На рис. 1 представлені термограми сушіння крапель емульсій фосфоліпідів з мальтодекстрином у співвідношенні складових як 1:1 і вмістом сухих речовин $C_o = 10\%$, 20% та 40% .

Як видно (рис.1), термограми мають характер, притаманний багатьом колоїдним системам: миттєвий набір температури краплі з перших секунд її прогрівання до температури кипіння розчинника (води) $\sim 100^\circ\text{C}$ (до крапки кр.2), виражена стадія кипіння (поміж критичними крапками кр.2-кр.3) розчину (води) під утвореною поверхневою кірочкою і надто тривала стадія досушування до виходу температури краплі на температуру теплоносія ($T_k = T_n$).

За результатами обробки термограм (рис. 1) були побудовані графічні залежності темпу прогрівання крапель у стадіях кіркуттворення $(dT/d\tau)_{\text{кірк}} = f(T_n)$ та досушування $(dT/d\tau)_{\text{дос}} = f(T_n)$, відносної тривалості їх сушіння до критичних крапок: кр.2 – $\tau_{\text{кр.2}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$; кр.3 – $\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$; відносної тривалості стадії кипіння – $\tau_{\text{кр.2-3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$ та стадії досушування – $\tau_v/\tau_{\text{заг}} = f(T_n)$.

Аналіз отриманих кінетичних залежностей показав, що збільшення температури сушіння і вмісту сухих речовин призводить до прискорення темпу прогрівання крапель ЕФЛ у стадії кіркуттворення (рис. 2, а) у 2...3 рази та зниження темпу прогрівання у стадії досушування у 1,3...2,0 рази.

За таких умов для ЕФЛ з $C_o \leq 20\%$ відбувається скорочення відносної тривалості стадії кіркуттворення на $\sim 20\%$, в той час, як для $C_o = 40\%$ відносна тривалість цієї стадії незалежно від температури залишається величиною постійною і становить $\leq 0,2$.

В стадії кипіння спостерігалась постійність значень відносної тривалості $\tau_{\text{кр.2-3}}/\tau_{\text{заг}}$ для ЕФЛ з $C_o = 10\%$ та 40% : незалежно від температури теплоносія вони складали в межах 0,2 і $\leq 0,1$ відповідно. Для ЕФЛ з

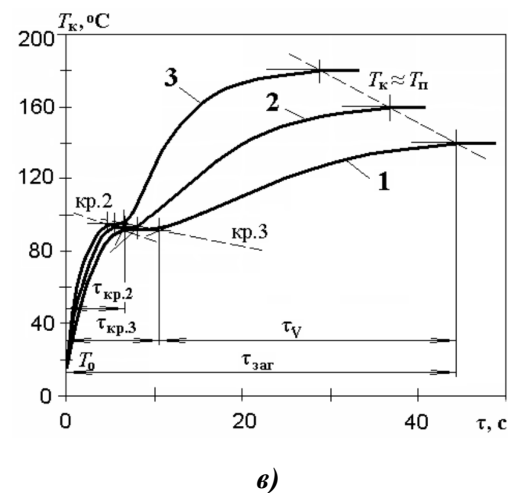
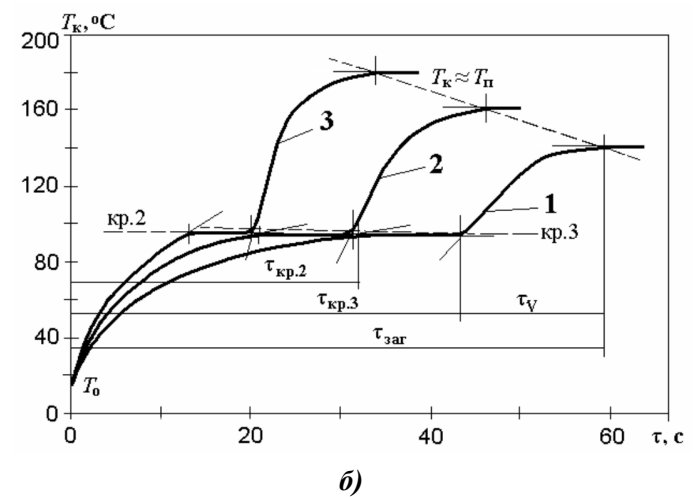
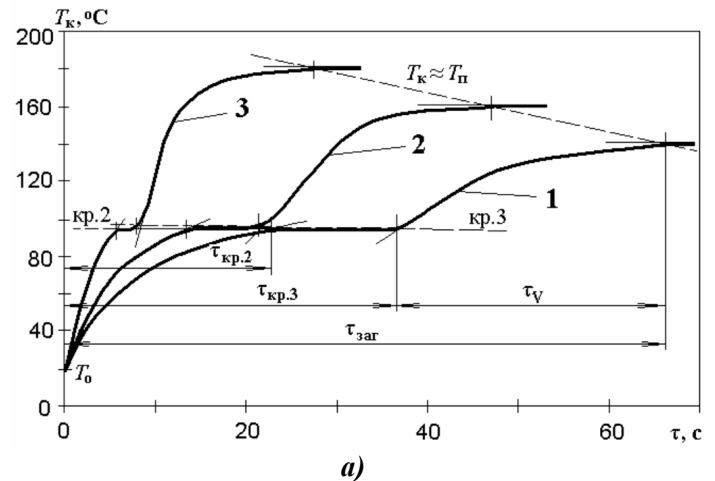


Рис. 1. Термограми сушіння крапель емульсій фосфоліпідів з мальтодекстрином при співвідношенні 1:1 і C_o :

а) 10 %; б) 20 %; в) 40 % при T_n : 1 – 140°C ; 2 – 160°C ; 3 – 180°C .

$C=20\%$ при збільшенні температури теплоносія від 140°C до 180°C спостерігається скорочення відносної тривалості стадії кипіння у 2 рази.

В результаті при збільшенні вмісту сухих речовин у ЕФЛ від 10% до 20 % відносна тривалість сушіння крапель до крапки кр.3 $\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{заг}}$ (рис. 2, б) при $T_{\text{н}}=160^{\circ}\text{C}$ скорочується у 1,5 рази, а при $T_{\text{н}}=180^{\circ}\text{C}$ – у 2,7 рази. Збільшення вмісту сухих речовин до 40 % сприяє зменшенню значень $\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{заг}}$ і складає $\geq 0,2$, за рахунок чого відбувається значне подовження відносної тривалості стадії досушування $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{заг}}$, яка становить $\sim 0,8$, що є надто високим показником, характерним для складних колоїдних систем. Така тривала стадія досушування свідчить про низьку інтенсивність процесу вологопереносу крізь поверхневу кірочку висушуваної краплі на завершальній стадії досушування і вірогідність утримання всередині висушуваної частки залишків водної пари, що побічно підтверджується дослідження фізичного стану висушених часток.

Аналіз графічних залежностей $\tau_{\text{заг}}=f(C_0)$, представлених на рис. 2 (в), показав, що при збільшенні вмісту сухих речовин у ЕФЛ від 10% до 40% відбувається скорочення загального часу сушіння при температурах теплоносія 140°C та 160°C (криві 1 та 2), при цьому показники кривої 2 ($T_{\text{н}}=160^{\circ}\text{C}$) нижчі за показники кривої 1 на $\sim 20\%$. При $T_{\text{н}}=180^{\circ}\text{C}$ скорочення загального часу сушіння відбувається при збільшенні вмісту сухих речовин від 10% до 20 %, а при $C_0 > 20\%$ загальний час сушіння крапель є величиною постійною $\tau_{\text{заг}}=\text{const}$ (крива 3). Виходячи з аналізу кривих 2 і 3 (рис.2,б), збільшення температури сушіння від 160°C до 180°C сприяє скороченню часу сушіння на 25...30%.

На рис. 3 представлені фотографії початкових крапель (δ_0) та кінцевих часток ($\delta_{\text{кін}}$), висушених при температурах теплоносія 140, 160 та 180°C . Як видно, усі

висушені частки були тонкостінними, роздутими з формами, близькими до сферичної, і розмірами більшими за початкові ($\delta_{\text{кін}} \geq \delta_0$).

При обстеженні фізичного стану висушених часток за допомогою спеціального тонкого металевого зонду, було встановлено, що незалежно від температури сушіння та вмісту сухих речовин частки в потоці високотемпературного теплоносія перебували у м'якому і пружньо-пластичному стані, легко деформувались при натисканні, проте адгезійних властивостей не проявляли. Слід зауважити, що схильність часток до деформації при механічних навантаженнях, які відбуваються у процесі сепарації, вивантаженні порошку з сушильної камери, пакуванні і зберіганні, призводить до негативних наслідків – злежуваності порошку, грудкування і погіршенню структурно-механічних властивостей.

Частки, отримані з ЕФЛ з $C_0=40\%$ при $T_{\text{н}}=180^{\circ}\text{C}$, у потоці високотемпературного теплоносія перебували у в'язко-пластичному стані, що, як показала відеозйомка процесу сушіння, свідчить про збільшення вірогідності адгезійних явищ в камері розпилювальної сушарки.

В охолодженному стані частки з ЕФЛ з $C_0=10\%$, висушені при температурі $T_{\text{н}}=160^{\circ}\text{C}$, були сухими та крихкими (тонкі стінки розсипались при торканні), а висушені при температурі $T_{\text{н}}=180^{\circ}\text{C}$ – зберігали м'який та пружньо-пластичний стан. Частки з ЕФЛ з $C_0 \geq 20\%$, висушені при температурі $T_{\text{н}}=160...180^{\circ}\text{C}$, після охолодження ставали сухими, твердими, міцними і не піддавались ні деформації, ні руйнуванню.

При збільшенні вмісту мальтодекстрину у 20%-вій ЕФЛ (при співвідношенні як 1:3) при температурі сушіння 160°C , як показали дослідження, спостерігається тенденція до збільшення відносної тривалості сушіння до крапки кр.3, за умов скорочення стадії кипіння $\tau_{\text{кр.2-3}}/\tau_{\text{заг}}$ у 2 рази, і, відповідно, скорочення тривалості

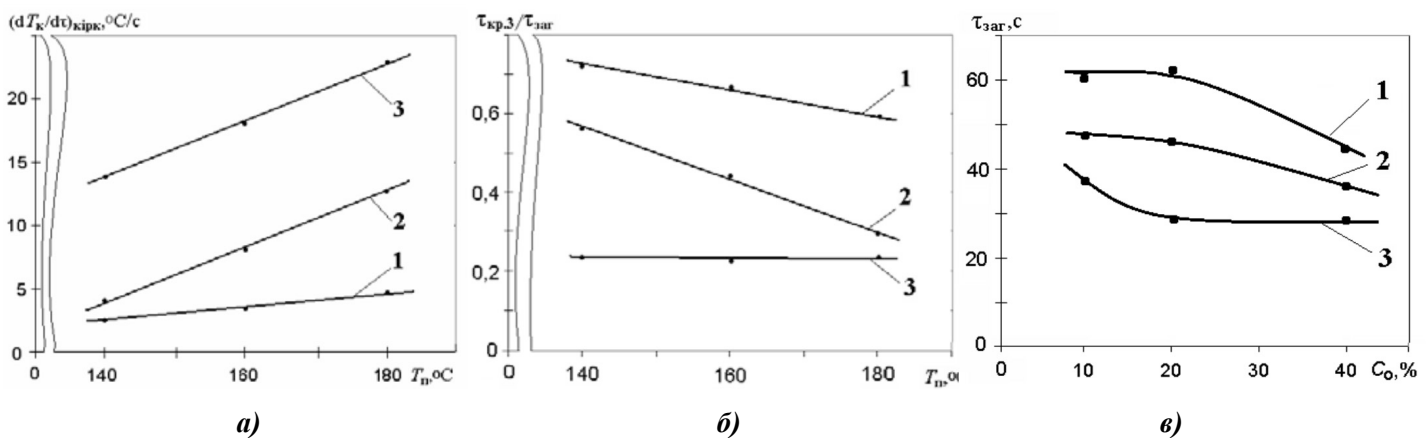


Рис. 2. Графічні залежності процесу сушіння крапель ЕФЛ:

а) $(dT/dt)_{\text{кр,к}} = f(T_{\text{н}})$ і б) $\tau_{\text{кр.3}}/\tau_{\text{заг}} = f(T_{\text{н}})$, з вмістом сухих речовин $C_0 = 1 - 10\%$; 2 – 20%; 3 – 40%;

в) $\tau_{\text{заг}} = f(C_0)$, при температурі сушіння: 1 – 140°C ; 2 – 160°C ; 3 – 180°C .

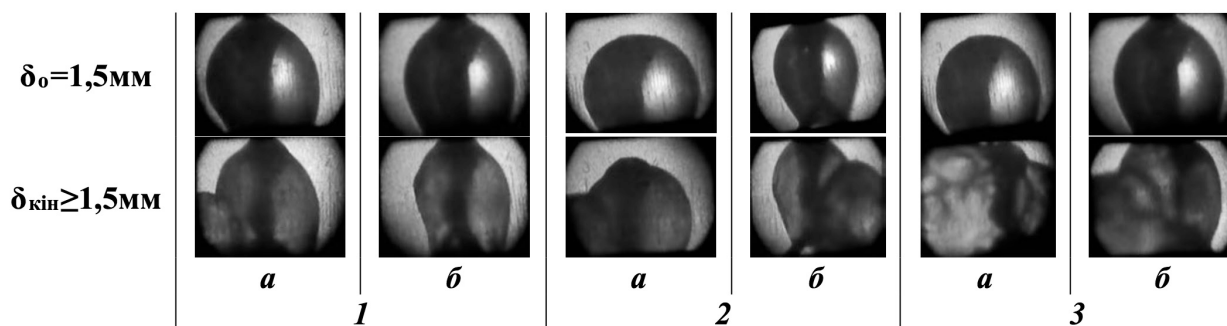


Рис. 3. Фотографії початкових (δ_0) та кінцевих ($\delta_{\text{кін}}$) крапель ЕФЛ з мальтодекстрином з вмістом сухих речовин C_0 : 1 – 10%; 2 – 20%; 3 – 40% в процесі сушіння при температурі теплоносія T_n : а) 160°C; б) 180°C.

стадії досушування на ~20%, при цьому загальний час сушіння скорочувався на 12%. Це свідчить про те, що умови висушування крапель цієї емульсії, виходячи з наведених даних, поліпшуються на відміну від умов протікання процесу при $T_n=180^\circ\text{C}$: стадія досушування скорочується лише на 7%, при малій тривалості стадії кипіння загальний час сушіння крапель навіть збільшується на 15%, що доводить недоцільність сушіння даної ЕФЛ при $T_n=180^\circ\text{C}$.

Зменшення вмісту мальтодекстрину у ЕФЛ ($C_0=15\%$ при співвідношенні лецитину та мальтодекстрину як 2:1) сприяє скороченню загального часу сушіння крапель при $T_n=160\text{--}180^\circ\text{C}$ десь на 10%. Однак, це досягається за умов подовження стадії досушування майже на 30%, що свідчить про збільшення вірогідності отримання на розпилювальній сушарці порошку з підвищеною вологістю і можливими відкладеннями порошку на стінках камери.

Таким чином, для отримання порошку з низькою вологістю доцільно на розпилювальну сушарку подавати емульсію фосфоліпідів з $C_0=20\text{--}30\%$ і співвідношенням складових як 1:1, а для закріплення структури та форми висушених часток, за рахунок чого покращуються структурно-механічні характеристики порошку, сепарацію та вивантаження порошку з камери здійснювати в охолодженому стані.

Дослідно-промислова апробація процесу розпилювального сушіння на розпилювальній сушарці РЦ-1,3 продуктивністю 10 кг/год по випареній волозі підтвердила доцільність напрацьованих у ході проведених досліджень рекомендацій. З великої серії проведених дослідів на розпилювальній сушарці найбільший вихід порошку з найкращими характеристиками був отриманий при сушінні ЕФЛ з $C_0=25\%$ при співвідношенні лецитину та мальтодекстрину 1:1 [9].

Висновки

Дослідження показали, що застосування мальтодекстрину сприяє покращенню умов структурування

поверхневої кірочки, яка формується в процесі зневоднення крапель, що забезпечує підвищення вологопровідних властивостей матеріалу при сушінні, в результаті чого при підвищенні температури сушіння до 180°C час сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними наноструктурами скорочується на 25...30%.

Експериментально встановлено, що для отримання на розпилювальній сушарці порошкової форми препаратів та продуктів з ліпідними наноструктурами з низькою кінцевою вологістю з використанням мальтодекстрину як структуруючої добавки доцільно дотримуватись наступних рекомендацій:

- вміст сухих речовин в емульсії фосфоліпідів, що подається в сушарку, має складати $25\pm 5\%$;
- співвідношення лецитину та мальтодекстрин в емульсії має складати 1:1;
- для покращення структурно-механічних характеристик порошку і збереження біологічно активних речовин у висушеному продукті забезпечити охолодження порошку на виході з сушильної камери.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долінський А.А., Шаркова Н.О., Авдєєва Л.Ю., Чунихін О.Ю. Дослідження властивостей фосфоліпідних наноструктур, отриманих з використанням ефекту дискретно-імпульсного введення енергії / Доповіді НАН України. 2011. №2. С. 71-75.
2. Авдєєва Л.Ю. Енергоефективна технологія отримання фосфоліпідних наноструктур / Промышленная теплотехника, 2011. Т.33. №8. С.139-143.
3. Авдєєва Л.Ю., Кравченко С.І. Дослідження властивостей везикулярних фосфоліпідних наноструктур з біологічно активними речовинами / Наукові праці ОНАХТ, 2012, вип. 42. Т. 2. С.130-133.
4. Авдєєва Л.Ю., Жукотский Э.К., Турчина Т.Я., Костянець Л.А., Ткаченко А.В. Исследование кинетики сушки капель водных суспензий лецитина / Промышленная теплотехника, 2012. Т. 34, № 2. С. 54-58.

5. Авдеева Л.Ю., Жукотский Э.К., Турчина Т.Я., Костянец Л.А., Ткаченко А.В. Влияние углеводо- и белковосодержащих структурирующих добавок на кинетику сушки капель суспензий фосфолипидов и адгезионные свойства высушенных частиц / Промышленная теплотехника, 2012. Т. 34, № 4. С. 18-23.

6. Авдеева Л.Ю., Жукотский Э.К., Турчина Т.Я., Костянец Л.А., Ткаченко А.В. Влияние белка как структурирующей добавки на кинетику сушки капель суспензии фосфолипидов / Наукові праці ОНАХТ. Одеса, 2012. Вип. 41, Т. 1. С. 57-60.

7. Патент на винахід ІТТФ НАН України № 104400 / Спосіб одержання сухого ліпосомального препарату

/ Долінський А.А., Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., Жукотський Е.К., Турчина Т.Я., Ткаченко О.В. Опубл. 27.01.2014. Бюл. № 2.

8. Турчина Т.Я., Жукотський Е.К. Дослідження впливу процесів структуроутворення на ефективність зневоднення складних колоїдних систем методом розпилювання / Промышленная теплотехника, 2014. Т. 36, № 5. С. 27-33.

9. Шаркова Н.О., Авдеева Л.Ю., Жукотський Е.К., Турчина Т.Я. Исследование и разработка технологии получения сухих липосомальных препаратов методом распылительной сушки / Промышленная теплотехника, 2013. Т. 35, № 7. С. 213-218.

INFLUENCE OF MALTODEXTRIN AS A STRUCTURAL ADDITIVE ON THE PROCESS OF DRYING DROPS OF PHOSPHOLIPID SUSPENSIONS

Turchina T.Y., Zhukotskiy E.K., Avdeeva L. Y., Makarenko A.A.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Zhelyabova street, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.03>

Emulsions with phospholipid nanostructures are heterogeneous disperse systems, which, when dried, show thermoplastic and adhesion properties. Improvement of their structure-forming and conducting properties in spray drying requires the use of structuring additives.

The purpose of the work was to investigate the effect of maltodextrin on the process of heat transfer by drying single droplets of emulsions with phospholipid nanostructures in order to determine the rationale heat-engineering parameters of powder form production.

Emulsions with phospholipid nanostructures and maltodextrin in different proportions of solids from 10% to 40% were investigated on the system of "drop-vapor-gas medium" in the stream of heated heat-carrier. The processes of forming, structuring and deformation changes of droplets during drying, the manifestation of thermoplastic and adhesion properties of dried particles under the influence of high temperatures and cooling were studied.

It was established that with the content of dry matter

of 20-30% and the ratio of lecithin and malto-dextrin as 1:1, it is achieved by reducing the drying time of droplets of emulsions with phospholipid nanostructures by 25-30%, and the strengthening of the structure of dried particles is provided by cooling them.

References 9, figures 3.

Key words: drop, drying, thermogram, film, emulsion of phospholipids, maltodextrin, thermoplasticity.

1. Dolinsky AA, Sharkova N.O., Avdeyeva L.Yu., Chunikhin O.Yu. [Investigation of the properties of phospholipid nanostructures obtained using the effect of discretely pulsed energy input] / Dopovidi NAN Ukrainy [Report of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2011. №2. P. 71-75 (in Ukr)

2. Avdeyeva L.Yu. [Energy-efficient technology for the production of phospholipid nanostructures] / Prom. teplotekhnika [Industrial heat engineering], 2011. T. 33. №8. С. 139-143 (in Ukr)

3. Avdeyeva L.Yu., Kravchenko S.I. [Investigation of the properties of vesicular fosfolipid nanostructures with biologically active substances] / Naukovi pratsi [Scientific Works] ONACHT, 2012, Is. 42. T. 2. P. 130-133 (in Ukr)

4. Avdeyeva L.Yu., Zhukotsky E.K., Turchina T.Ya., Konstantin L.A., Tkachenko A.V. [Investigation of kinetics of drying drops of aqueous suspensions of lecithin] / Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heat engineering], 2012. Vol. 34, No. 2. P. 54-58 (in Ukr)

5. Avdeyeva L.Yu., Zhukotsky E.K., Turchina T.Ya., Konstanets L.A., Tkachenko A.V. [Influence of carbohy-

drate and protein-containing structuring additives on kinetics of drying of drops of suspensions of phospholipids and adhesion properties of dried particles] / *Prom. teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2012. Vol. 34, No. 4. P. 18-23 (in Ukr)

6. *Avdeyeva L.Yu., Zhukotsky E.K., Turchina T.Ya., Kostianets L.A., Tkachenko A.V.* [The Influence of Protein as a Structural Additive on the Kinetics of Drying Drops of Phospholipid Suspension] // *Naukovi pratsi* [Scientific Works]. Odessa, 2012. Is. 41, T. 1. P.57-60 (in Ukr)

7. *Patent UA No. 104400* / [Method for obtaining a dry liposomal preparation] / Dolinsky AA, Sharkova N.O., Avdeyeva L.Yu., Zhukotsky E.K., Turchina T.Ya.,

Tkachenko O.N. Published on January 27, 2014. B. No. 2 (in Ukr)

8. *Turchina T.Ya., Zhukotsky E.K.* [Investigation of the influence of structuring processes on the efficiency of dewatering of complex colloidal systems by a method of sawing] / *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2014. T.36, №5. P.27-33 (in Ukr)

9. *Sharkova N.O., Avdeyeva L.Yu., Zhukotsky E.K., Turchina T.Ya.* [Research and development of technology for the production of dry liposomal preparations by spray drying] / *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2013. Vol. 35, No. 7. P. 213-218 (in Ukr)

Отримано 26.09.2018

Received 26.09.2018

УДК 621.036.7

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Фиалко Н. М., член-кор. НАН Украины, Степанова А. И., канд. техн. наук,
Шевчук С. И., канд. техн. наук, Сбродова Г. А., канд. физ.-мат. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.04>

Викладено основні етапи розроблених комплексних методик оцінки ефективності та оптимізації теплоутилізаційних систем, заснованих на принципах ексергетичного аналізу, статистичних методів планування експерименту, структурно-варіантних методів, методів багаторівневої оптимізації, теорії лінійних систем і термодинаміки незворотних процесів. Для прикладу наведено малюнки і формули, що ілюструють деякі з етапів розроблених методик.

Изложены основные этапы разработанных комплексных методик оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем, основанных на принципах эксергетического анализа, статистических методов планирования эксперимента, структурно-вариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, теории линейных систем и термодинамики необратимых процессов. В качестве примеров приведены рисунки и формулы, иллюстрирующие некоторые из этапов разработанных методик.

The main stages of the development of complex methods for assessing the efficiency and optimization of heat recovery systems based on the principles of exergic analysis, statistical methods for planning the experiment, structural-variant methods, methods of multilevel optimization, the theory of linear systems and the thermodynamics of irreversible processes are outlined. Examples and illustrations illustrate some of the stages in the development of complex methods.

Библ. 14, рис. 5.

Ключевые слова: теплоутилизационные системы, комплексные методики, эффективность, оптимизация.

c_p – изобарная теплоемкость, кДж/кг·К;
 $\dot{E}$ – эксергетическая мощность, кВт;
 F – площадь боковой поверхности, м²;
 f – площадь поперечного сечения, м²;
 G – массовый расход теплоносителя, кг/с;
 i – удельная энтальпия, кДж/кг;
 m – масса, кг;
 N – мощность, кВт;
 p – давление, кПа;
 p_s – давление насыщенного водяного пара, кПа;
 $\dot{Q}$ – тепловая мощность, кВт;
 s – удельная энтропия, кДж/кг;
 T – температура, К;
 $T_{ст1} (T_{ст2})$ – температура стенки со стороны дымовых газов (воздуха), К;
 t – время, с;
 W – влагосодержание;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке, кВт/м²·К;
 α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, кВт/м²·К;
 δ – толщина стенки, м;
 λ – коэффициент теплопроводности, кВт/м·К;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 ρ – плотность, кг/м³.

Индексы верхние:

дг – дымовые газы;
вод – вода;
внут – внутренний.

Индексы нижние:

пот – потери;
ст – стенка;
вх, вых – вход, выход.

Актуальность. В настоящее время Украина обладает необходимым потенциалом для реализации эффективных энергосберегающих технологий утилизации теплоты, в связи с чем проблема их разработки и внедрения является актуальной для энергетики страны. Решение данной проблемы связано с необходимостью системных исследований эффективности и оптимизации теплоутилизационных установок с позиций современных методических подходов.

Анализ последних исследований и публикаций. Современные подходы к анализу эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем включают мето-

ды эксергетического анализа, статистические методы планирования эксперимента, методы теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов, структурные, структурно-вариантные методы, методы многоуровневой оптимизации и др. Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем необходима разработка комплексных методик, основанных на том или ином сочетании указанных методов, а также обоснованный выбор методики для каждого конкретного случая. Обоснованный выбор методики повышает результативность оптимизации, так как позволяет при разработке конструкции теплоутилизационной си-

стемы использовать параметры, максимально приближенные к оптимальным, что, в свою очередь, увеличивает эффективность системы [1-14].

Цель работы – повышение эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок на основе разработки и применения комплексных методик анализа эффективности и оптимизации.

Материалы и методы исследования. Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем и их отдельных элементов разработаны и использованы методики, основанные на методах эксергетического анализа, статистических методах планирования эксперимента, методах теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов, структурно-вариантных методах, методах многоуровневой оптимизации.

Результаты исследований. Создание новых комплексных методик оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем включает в качестве необходимого общего для всех методов этапа разработку новых критериев эффективности. Предложенные тепло-эксергетический $\varepsilon = E_{\text{пот}}/Q$ и эксерго-технологический $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{пот}} \cdot m/Q^2$ критерии эффективности обладают высокой чувствительностью к изменению режимных и конструктивных параметров теплоутилизационных систем за счет включения в них эксергетической характеристики $E_{\text{пот}}$. Указанные критерии одновременно служат целевыми функциями оптимизации.

Далее изложены основные этапы шести разработанных комплексных методик и в качестве примеров приведены рисунки и формулы, иллюстрирующие некоторые из этапов.

I. Для несложных теплоутилизационных систем или их отдельных элементов методика оценки эффективности и оптимизации позволяет определить функциональные зависимости выбранных критериев эффективности от основных параметров системы. Если такие зависимости установлены, оптимизация проводится с помощью известных математических методов.

Основные этапы методики определения указанных функциональных зависимостей состоят в следующем:

- с помощью балансовых методов эксергетического анализа составить систему эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений, дополненную соответствующими гидродинамическими уравнениями и уравнениями теплопередачи – (1);
- из системы балансовых уравнений определить необходимые эксергетические характеристики, входящие в разработанные критерии эффективности и рассчитать соответствующие критерии;
- используя статистические методы планирования эксперимента, получить функциональные зависимости критериев эффективности от необходимых параметров в виде полинома – (2), рис. 1;

- при наличии указанных функциональных зависимостей рассмотреть общую задачу оптимизации в виде:

$$\vec{K}^{\text{опт}}(\vec{x}_k, \vec{x}_i, \vec{x}_r = f(\vec{x}_k), \vec{x}_p = f(\vec{x}_i)) \rightarrow \min(\max) \vec{K}(\vec{x}_k, \vec{x}_i), \\ \vec{x}_k \in X, \quad 0 \leq |X| \leq N_x \angle \infty; \quad \vec{x}_i \in Y, \quad 0 \leq |Y| \leq N_y \angle \infty,$$

K – вектор целевых функций; $\vec{x}_k, \vec{x}_i$ – векторы варьируемых конструктивных и режимных параметров; $\vec{x}_r = f(\vec{x}_k)$, $\vec{x}_p = f(\vec{x}_i)$ – векторы функций конструктивных и режимных варьируемых параметров; X, Y – области существования ограничений; N_x, N_y – границы области существования ограничений.

Система эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений для водоподогревателя, входящего в теплоутилизационную систему, предназначенную для нагрева обратной сетевой воды, имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^m N_i + E_{\text{вых}}^{\text{дг}} + E_{\text{вых}}^{\text{вод}} - E_{\text{вх}}^{\text{дг}} + E_{\text{вх}}^{\text{вод}} = 0;$$

$$G^{\text{дг}} i^{\text{дг}} - G^{\text{вод}} i^{\text{вод}} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n G_{i\text{вх}} - \sum_{i=1}^n G_{i\text{вых}} = \text{const},$$

$$E_{\text{вх}}^{\text{дг}} - E_{\text{вых}}^{\text{дг}} = G^{\text{дг}} \left[c_{\text{ср}}^{\text{дг}} (T_{\text{вх}}^{\text{дг}} - T_{\text{вых}}^{\text{дг}}) - \right. \\ \left. - T_0 \left(c_{\text{ср}}^{\text{дг}} \ln \frac{T_{\text{вх}}^{\text{дг}}}{T_{\text{вых}}^{\text{дг}}} - \frac{R}{\mu^{\text{дг}}} \ln \frac{p_{\text{вх}}^{\text{дг}} - \varphi_{\text{вх}} p_s(T_{\text{вх}})}{p_{\text{вых}}^{\text{дг}} - \varphi_{\text{вых}} p_s(T_{\text{вых}})} \right) \right] + \\ + G^{\text{дг}} W_{\text{вх}} \left[(i_{p_{\text{вх}}} - i_{p_0}) - T_0 (s_{p_{\text{вх}}} - s_{p_0}) \right] - \\ - G^{\text{дг}} W_{\text{вых}} \left[(i_{p_{\text{вых}}} - i_{p_0}) - T_0 (s_{p_{\text{вых}}} - s_{p_0}) \right]; \\ E_{\text{вх}}^{\text{вод}} - E_{\text{вых}}^{\text{вод}} = G^{\text{вод}} \left[(i_{\text{вх}}^{\text{вод}} - i_{\text{вых}}^{\text{вод}}) - T_0 (s_{\text{вх}}^{\text{вод}} - s_{\text{вых}}^{\text{вод}}) \right]. \quad (1)$$

Функциональная зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от режимных параметров водоподогревателя:

$$k_{\text{ex}}^T = 3,52 - 44,81 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} + 179,32 (W_{\text{вх}}^{\text{дг}})^2 + 1,79 W_{\text{вых}}^{\text{дг}} - \\ - 145,01 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} W_{\text{вых}}^{\text{дг}} + 205,73 (W_{\text{вых}}^{\text{дг}})^2 - \\ - 0,90 \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} + 5,85 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} - 1,22 W_{\text{вых}}^{\text{дг}} \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} + \\ + 0,08 (\text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}})^2. \quad (2)$$

Для сложных теплоутилизационных систем, включающих большое количество элементов, при построении математических моделей, необходимых для их оп-

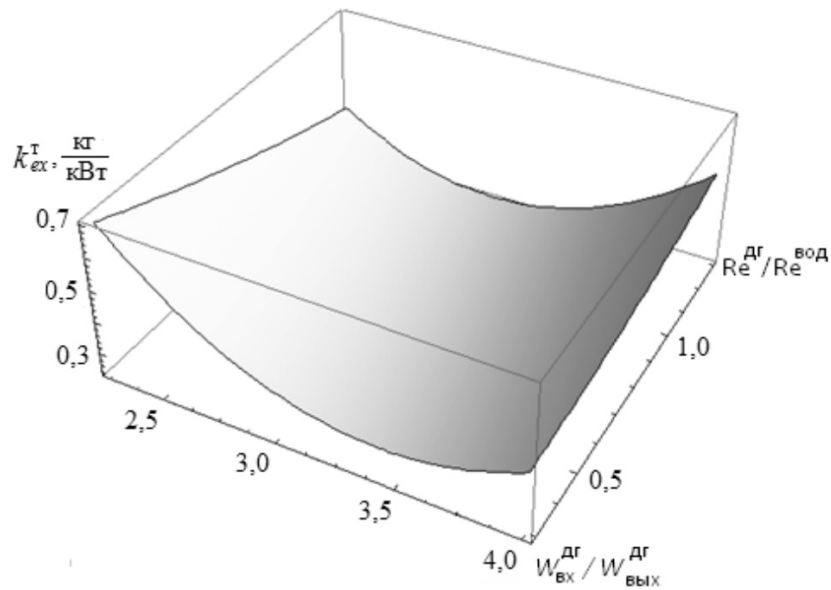


Рис. 1. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для водоподогревателя.

тимизации, не представляется возможным установить общие аналитические зависимости целевых функций оптимизации от параметров системы. В этих случаях целесообразно разработать для таких систем комплексные методики, построенные на основных принципах эксергетических, структурно-вариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов в том или ином их сочетании.

II. Методика, основанная на принципах эксергетического и структурно-вариантного метода, позволяет распознать в теплоутилизационной системе элементы, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установки в целом, и оптимизировать эти элементы. Основные этапы методики следующие:

- разработать структурную схему установки, состоящую из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры – рис. 2;
- провести тепловые и эксергетические расчеты для распознавания элементов, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установки в целом – выделенные элементы на рис. 2;
- оптимизировать выделенные элементы с помощью определенных методов, например, балансовых методов эксергетического анализа и статистических методов планирования эксперимента;
- ввести оптимизированные элементы в общие схемы установок;

- использовать на следующих этапах оптимизации полученные значения оптимальных параметров элементов в качестве начальных условий.

III. Методика, основанная на принципах многоуровневой оптимизации, позволяет свести сложную многокритериальную и многопараметрическую оптимизационную задачу к более простым локальным взаимосогласованным оптимизационным задачам каждого уровня. Основные этапы методики следующие:

- разделить теплоутилизационную систему на несколько уровней оптимизации;
- разработать блок-схему и схему рекурсивного обхода уровней оптимизации, которая позволяет осуществлять постоянный информационный обмен между уровнями оптимизации – рис. 3;
- при построении математической модели данного уровня использовать в качестве переменных параметров варьируемые параметры объекта данного уровня, а в качестве постоянных – оптимальные параметры, которые являются результатами решения локальных оптимизационных задач других уровней;
- для построенных таким образом математических моделей на каждом уровне оптимизации решить соответствующую оптимизационную задачу и определить оптимальные значения параметров;
- уточнять получаемые оптимальные параметры с помощью дополнительных итераций.

IV. Методика, основанная на принципах теории линейных систем, а именно, на принципах метода *RP*-представления термодинамических балансов в мат-

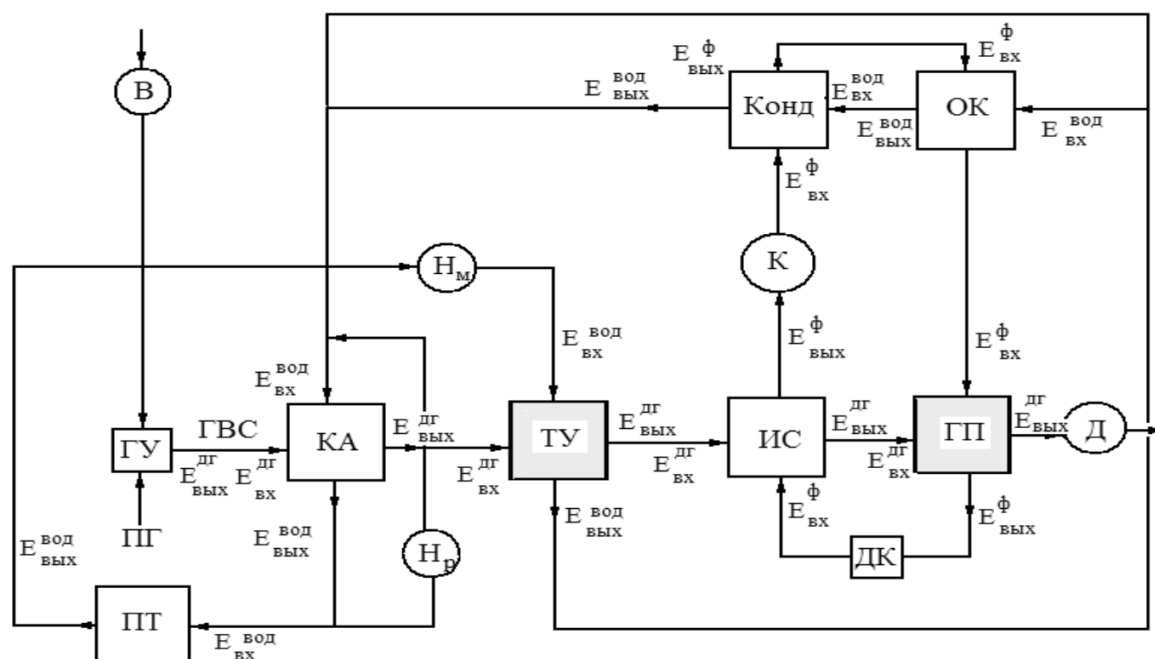


Рис. 2. Схема энергетических потоков установки для нагрева обратной теплосетевой воды: ГУ – горелочное устройство; КА – котлоагрегат; ТУ – теплоутилизатор; ИС – испаритель; Конд – конденсатор; ОК – водогрейный охладитель конденсата рабочего вещества теплового насоса; ГП – газоподогреватель; ДК – дроссельный клапан; ПТ – потребитель теплоты; В – вентилятор; НМ, НР – насосы; Д – дымосос.

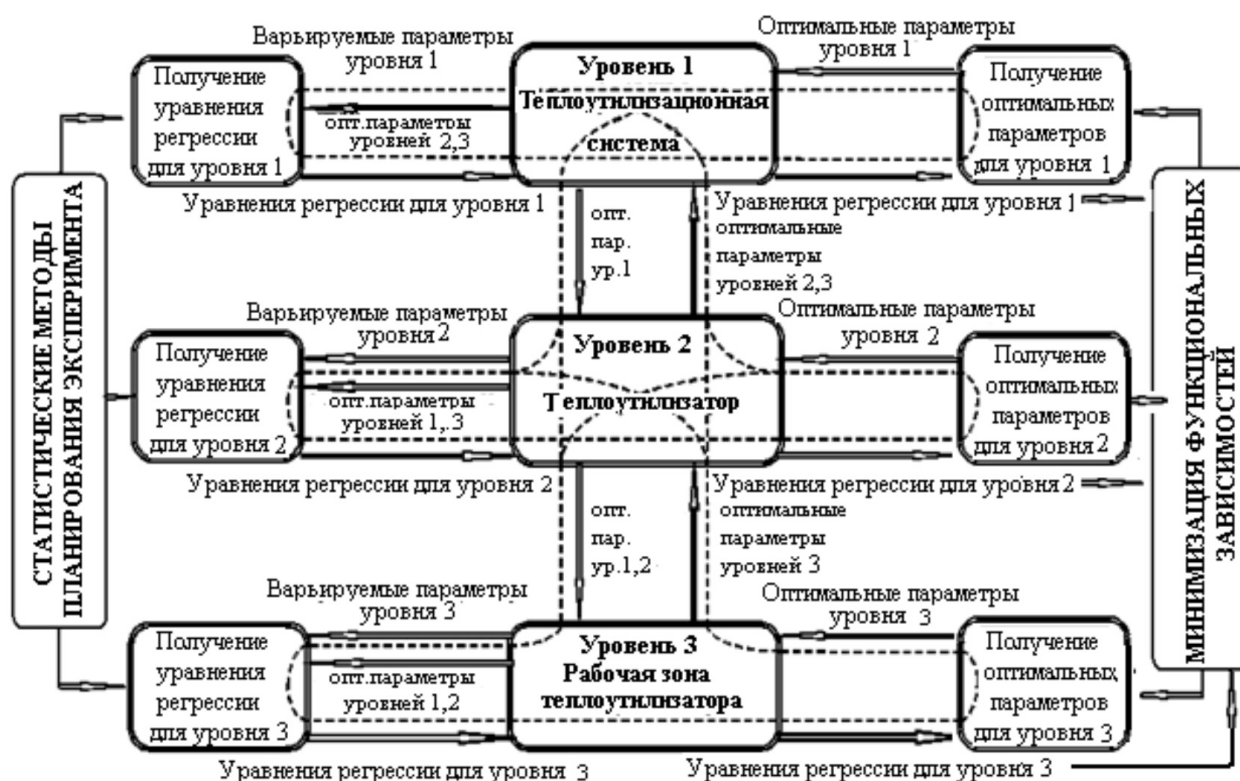


Рис. 3. Блок-схема многоуровневой оптимизации теплоутилизационной системы для подогрева обратной воды котельных (пунктирной линией обозначена схему рекурсивного обхода уровней оптимизации).

ричной форме, позволяет рассчитать потери эксергетической мощности в каждом элементе установки и определить относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость процессов в установке. Этапы методики следующие:

- разработать структурную схему установки, состоящую из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры – см. рис. 2;
- записать балансы массы, энергии и эксергии установки в матричной форме – (4);
- установить типы термодинамических потоков и представить все термодинамические балансы и термодинамические потоки исследуемой установки в системе источник-продукт;
- построить соответствующие матрицы, с помощью которых рассчитать степень необратимости процессов в установке – (5);
- провести сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных элементах установки и определить относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость процессов – рис. 4.

Балансы массы, энергии и эксергии установки в матричной форме:

$$A_M M = 0,$$

$$A W = 0$$

$$A E = E_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Здесь A_M – матрица входящих масс; M – столбец (вектор), содержащий потоки массы; A – полная входная матрица; W – столбец, содержащий потоки энергии; E – столбец, который содержит эксергию потоков массы, тепла и работы; $E_{\text{пот}}$ – искомый столбец (вектор), элементы которого $E_{\text{пот}i}$ характеризуют потерю эксергии в i -том элементе исследуемой установки.

Полная входная матрица A для установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха, имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Разработанная методика использована для анализа работы установки при различных режимах работы котла.

V. Методика расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи на основе использования комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов, позволяет рассчитать общие потери эксергетической мощности в установке и установить долю потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в общих потерях. Основные этапы методики следующие:

- разработать математическую модель исследуемых процессов, которая включает уравнение эксергии, уравнения баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности трехфазной термодинамической системы при изменении концентрации одной из фаз, уравнения движения фаз, уравнение энергий, уравнения баланса энтропий, уравнения Гиббса и уравнение теплопроводности при граничных условиях третьего рода;
- получить локальное дифференциальное уравнение баланса эксергии, которое может быть использовано для расчета эксергетических потерь и решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах;
- решить совместно локальное дифференциальное уравнение баланса эксергии и уравнение теплопроводности и получить формулы для расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи – (6);
- рассчитать общие потери эксергетической мощности и установить долю потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности в общих потерях – рис.5.

$$E_{\text{пот}} = \frac{T_0 \lambda F}{\delta} \left[\frac{2K - L}{-G(K - L + R)} - \frac{L}{GR} - \frac{2K}{G\sqrt{G}} \ln \frac{(2K - L - \sqrt{G})(-L + \sqrt{G})}{(2K - L + \sqrt{G})(-L - \sqrt{G})} \right].$$

$$K = A/B; L = PK + N; R = M + PN;$$

$$P = (D + A)/A; M = T_0 B/A(\vartheta_1 - T_0);$$

$$N = (C + A)/B; G = L^2 - 4KR; A = Bi_1 Bi_2;$$

$$B = Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 Bi_2; C = Bi_1 + Bi_2; D = Bi_1. \quad (6)$$

VI. Методика расчета потерь эксергетической мощности в теплоутилизационных системах, сочетающая эксергетические методы с методами, построенными на расчете диссипаторов эксергии, позволяет разделить потери эксергетической мощности по причинам и об-

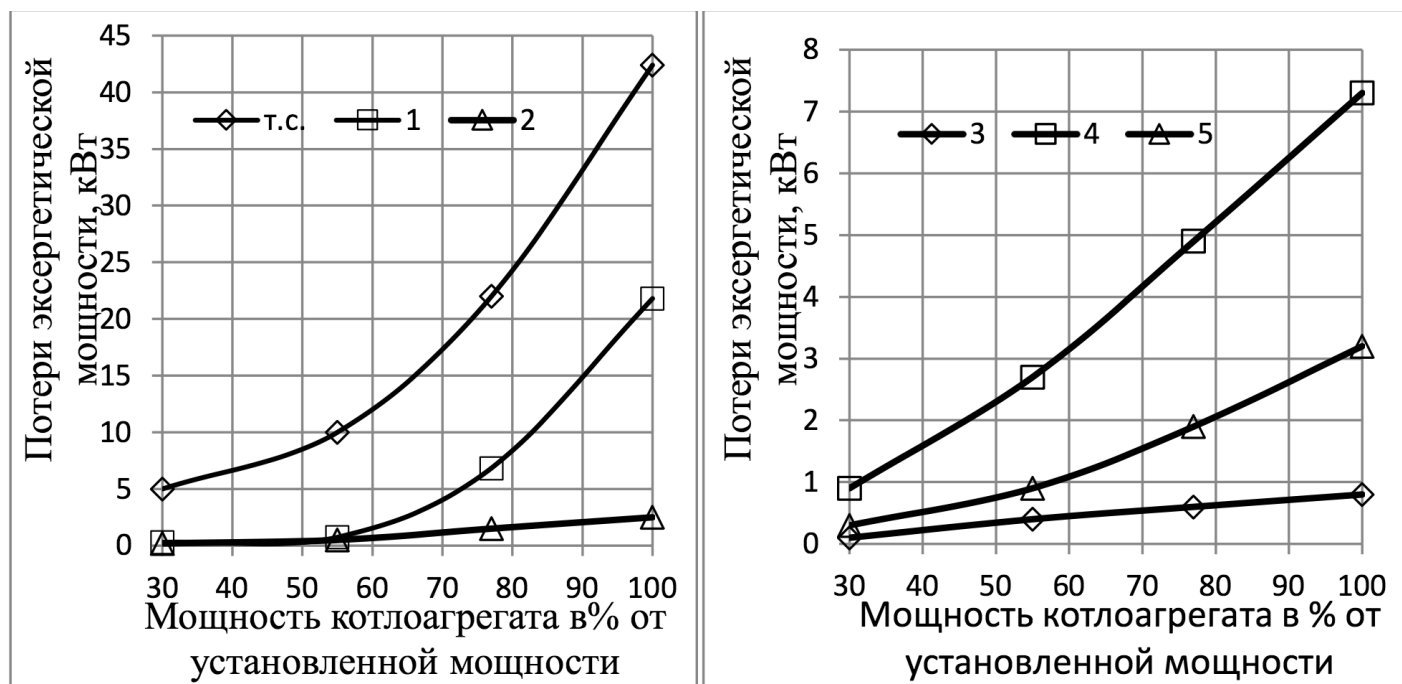


Рис. 4. Потери эксергетической мощности в зависимости от мощности котла, т.с. – тепло-утилизационная система: 1,2 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор.

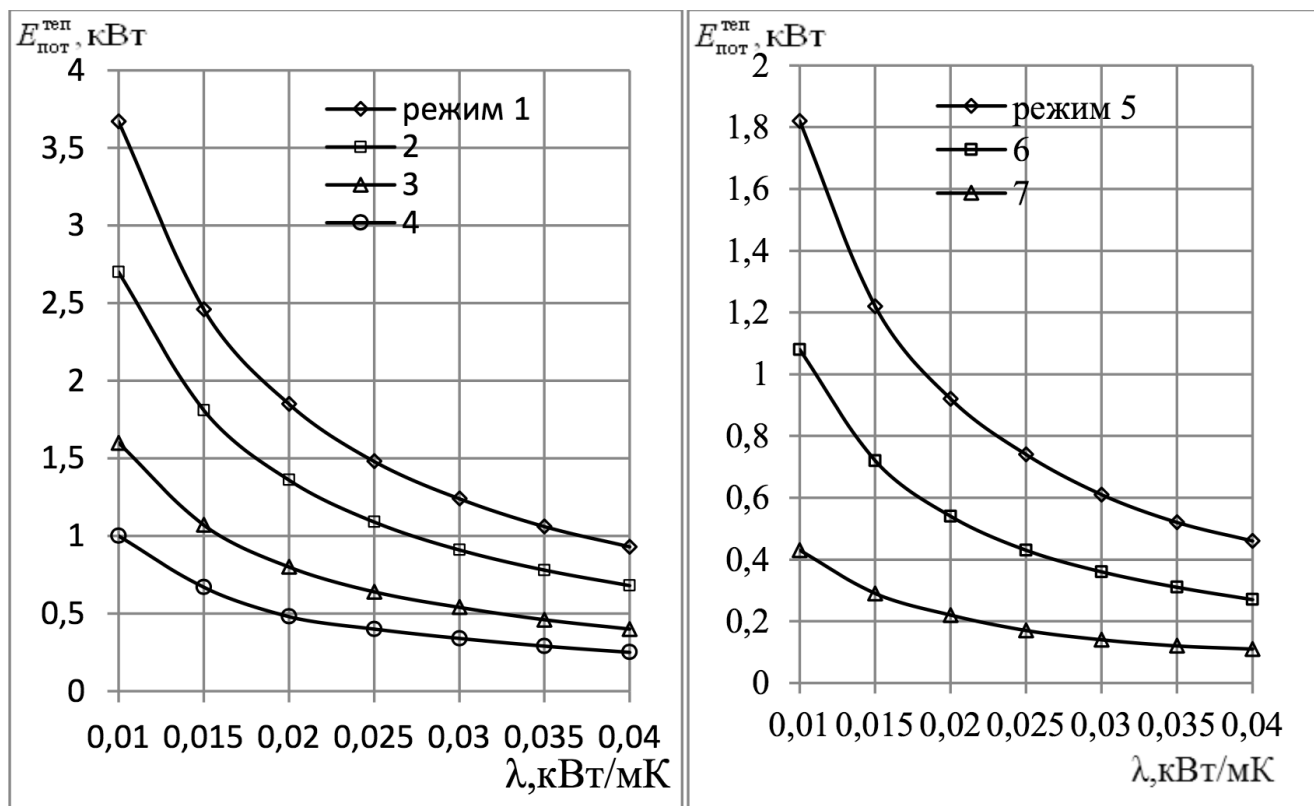


Рис. 5. Зависимость потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности от коэффициента теплопроводности при различных режимах работы котла.

ластям их локализации и выявить условия, при которых эти потери будут минимальными. Основные этапы методики следующие:

- разработать математическую модель исследуемых процессов, которая включает уравнение эксергии, уравнения баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности, уравнения движения фаз, уравнение энергий, уравнения баланса энтальпий и уравнения Гиббса:

- получить локальные дифференциальные уравнения баланса энтропии и эксергии, которые могут быть использованы для расчета эксергетических потерь и решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах;

- получить формулы для расчета диссипаторов эксергии:

- диссипаторов, характеризующих потери эксергетической мощности вследствие неравновесного теплообмена между теплоносителями;

- диссипаторов, связанных с необратимыми потерями эксергетической мощности теплоносителей вследствие их вязкости (гидродинамическими потерями) – (7);

- рассчитать общие потери эксергетической мощности и установить долю гидродинамических потерь и потерь эксергетической мощности вследствие неравновесного теплообмена в общих потерях.

$$R_{\alpha 1} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_1 F T_{\text{дг}} T_{\text{ст1}}}, R_{\lambda} = \frac{T_0 Q^2 \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}} F T_{\text{ст1}} T_{\text{ст2}}},$$

$$R_{\alpha 2} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_2 F T_{\text{воз}} T_{\text{ст2}}},$$

$$R_{G1} = \frac{(G^{\text{дг}})^3 \xi^{\text{дг}} T_0}{2 T^{\text{дг}} (\rho^{\text{дг}})^2 (f^{\text{дг}})^2},$$

$$R_{G2} = \frac{(G^{\text{воз}})^3 \xi^{\text{воз}} T_0}{2 T^{\text{воз}} (\rho^{\text{воз}})^2 (f^{\text{воз}})^2}. \quad (7)$$

- Полученные формулы для диссипаторов эксергии, связанных с потерями вследствие неравновесного теплообмена между теплоносителями и с гидродинамическими потерями, могут быть использованы для расчета потерь эксергетической мощности в теплоутилизационных системах и в их отдельных элементах, например, в газозвоздушных пластинчатых теплоутилизаторах.

Выводы

1. Разработаны комплексные методики оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем и их отдельных элементов, основанные на принципах эксергетического анализа, статистических методов планирования эксперимента, структурновариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, методов

теории линейных систем и термодинамики необратимых процессов.

2. Использование разработанных методик увеличивает эффективность теплоутилизационных систем и их отдельных элементов, поскольку повышение результативности оптимизации позволяет при разработке их конструкций использовать параметры, максимально приближенные к оптимальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. (1967) Эксергетический метод и его приложения, М.: «Мир», 286с.
2. Дьярмати И. (1974) Неравновесная термодинамика, М.: «Мир», 247с.
3. Пехович А.И. (1976) Расчеты теплового режима твердых тел. / Жидких В.М. Ленинград. Энергия, 351.
4. Pardo E. (1991) Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid, 238.
5. Alvarado S. (1994) Cherardelli C. Exergoeconomic Optimization of Cogeneration Plant. Energy 124.
6. Fabbi G. (1998) Heat Transfer Optimisation in Internally Finned Tubes under Laminar Flow Condition // Int. J. Heat Mass Transfer, 41, 1243-1253.
7. Valero A. (1998) Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems / Torres C. ASME Book no. G00452 WAM, 7, 13 – 23.
8. Фиалко Н.М. (2011) Эксерго-технологическая эффективность газозвоздушных теплоутилизаторов энергетических установок / Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Степанова А. И. и др. // Промышленная теплотехника, 33(3), 42 – 49.
9. Фиалко, Н.М., Пресіч, Г.О., Навродська, Р.О., Гнедаш, Г.О. (2013). Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти викидних газів котельної установки. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва, (755), 429–434.
10. Фиалко Н.М. (2014) Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами / Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А. и др. // Промышленная теплотехника, 36(1), 41 – 46.
11. Навродська, Р.О. (2015). Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики. Науковий вісник НЛТУ України, 25(9), 225–229.
12. Степанова А.И. (2016) Макроскопическая модель трехфазной термодинамической системы переменной массы // Энергетика і автоматика, (4), 133-144.
13. Фиалко Н.М. (2017) Анализ эффективности котельной установки с комбинированной теплоутилизационной системой при различных режимах работы котла / Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А. и др. // Промышленная теплотехника, 39(1), 33 – 39.

14. Navrodska R. (2018). Експериментальні дослідження теплообміну під час глибокого охолодження продуктів згоряння газоспоживальних котлів / Navrodska, R.A., Stepanova, A.I., Shevchuk, S.I., Gnedash, G.A., &

Presich, G.A. Науковий вісник НЛТУ України, 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>.

COMPREHENSIVE METHODS OF EVALUATION OF EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF HEAT-UTILIZATION SYSTEMS

Fialko M., Stepanova A., Shevchuk S., Sbrodova G.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zheliabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.04>

At present, Ukraine has the necessary potential for the implementation of effective energy-saving technologies for heat recovery, and therefore the problem of their development and implementation is relevant for the country's energy sector. The solution of this problem is related to the need for systematic studies of the efficiency of optimization of heat recovery facilities from the standpoint of modern methodological approaches. The paper outlines the main stages in the development of integrated methods for assessing the efficiency and optimization of heat recovery systems based on the principles of exergic analysis, statistical methods for planning the experiment, structured variational methods, multilevel optimization methods, the theory of linear systems and the thermodynamics of irreversible processes. Examples and illustrations illustrate some of the stages in the development of complex methods. The necessary general step in the development of methodologies is the development of new performance criteria. Such criteria are highly sensitive to changes in the regime and design parameters of heat recovery systems due to the inclusion of some exergic characteristics in them. The developed criteria also serve as target optimization functions.

For individual elements of heat recovery systems, efficiency and optimization methods usually include the definition of the functional dependencies of the selected efficiency criteria on the main parameters. For this, balance methods of exergic analysis and statistical methods of experiment planning are used. If such dependencies are established, optimization is carried out using known mathematical methods. For complex heat recovery systems involving a large number of elements, it is not possible to establish general analytical dependencies of the optimization objective functions on the parameters of the system when constructing mathematical models necessary for their optimization. Complex methods based on the basic principles of structural-variant methods, methods of multilevel optimization, the theory of linear systems, and the thermodynamics of irreversible processes have been developed for such cases. For this purpose, structural diagrams of plants, block diagrams of multilevel optimization have been developed, complete input matrices have been constructed, mathematical models for the processes under investigation have been developed, formulas have been derived for calculating the loss of exergy power in heat conduction processes and formulas for calculating dissipators of exergy. A well-founded choice of the methodology for evaluating efficiency and optimization raises the effectiveness of optimization, since it allows the use of parameters maximally close to optimal when developing the heat recovery system design, which in turn increases the efficiency of the system.

References 14, figures 5.

Key words: heat-utilization systems; complex methods; efficiency; optimization.

1. Brodyansky V. (Ed.), (1967). Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya [The exergy method and its applications]. Moskva: Mir, 286, [in Russian].
2. D'yarmati I. (Ed.), (1974). Neravnovesnaya termodinamika [Nonequilibrium thermodynamics]. Moskva: Mir, 247, [in Russian].
3. Pekhovich A. (1976). Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel [Calculations of the thermal regime of solids] / Zhydkikh V. Leninhad: Enerhiya, 351. [in Russian].
4. Pardo E. (1991) Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid, 238.
5. Alvarado S. (1994) Cherardelli C. Exergoeconomie Optimization of Cogeneration Plant. Energy 124.
6. Fabbi G. (1998) Heat Transfer Optimisation in Internally Finned Tubes under Laminar Flow Condition // Int. J. Heat Mass Transfer, 41, 1243-1253.
7. Valero A. (1998) Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems / Torres C. ASME Book no. G00452 WAM, 7, 13 – 23.
8. Fialko N. (2011). Eksergo-tekhnologicheskaya effektivnost' gazovozdushnykh teploutilizatorov energeticheskikh ustanovok [Exergo-technological efficiency of gas-air heat-recovery devices of power plants] / Fialko N., Prokopov V., Stepanova A. et al. Promyshlennaya teplotekhnika 33(3), 42-49. [in Russian].
9. Fialko, N.M. (2013). Ekologichna efektyvnist kombinovanykh system utylizatsiyi teploty vykydnykh haziv kotelnoyi ustanovky [Ecological efficiency of combined heat recovery systems waste of exhaust gases for boiler plant]. Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriya i praktyka budivnytstva [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. The theory and practice of construction] / Fialko, N., Presich, G., Navrodska, R., Gnedash, G. (755), 429 – 434. (in Ukr.)
10. Fialko N. (2014). Effektivnost' teploutilizatsionnoy ustanovki dlya kotel'nykh, optimizirovannoy razlichnymi metodami [The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods] / Fialko N., Stepanova A., Navrodska R. et al. Promyshlennaya teplotekhnika. 36(1), 41-46. [in Russian].
11. Navrodska R. (2015). Pidvyshchennya efektyvnosti teploutilizatsiynykh tekhnolohiy dlya kotel'nykh ustanovok komunalnoyi teploenerhetyky [Improving the efficiency of heat utilization technologies for municipal heating boilers]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 25(9), 225–229. (in Ukr.)
12. Stepanova A. (2016) Macroscopic model of a three-phase thermodynamic system of variable mass // Enerhetyka y avtomatyka, (4), 133-144 (in Rus.).
13. Fialko N. (2017). Analiz effektivnosti kotel'noy ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy pri razlichnykh rezhimakh raboty kotla [Analysis of the efficiency of the boiler plant with a combined heat recovery system under various operating conditions of the boiler] / Fialko N., Stepanova A., Navrodska R. et al. Promyshlennaya teplotekhnika. 39(1), 33-39. [in Russian].
14. Navrodska R. (2018). Eksperymentalni doslidzhennya teploobminu pid chas hlybokoho okholodzhennya produktiv zhoryannya hazospozhyvalnykh kotliv [Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers] / Navrodska R., Stepanova A., Shevchuk S., Gnedash G., Presich G. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620> (in Ukr.)

Отримано 17.09.2018

Received 17.09.2018

УДК 697.329: 621.577.22

НЕСТАЦІОНАРНИЙ ПЕРЕНОС ТЕПЛОТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ГРУНТОВОМУ ТЕПЛООБМІННИКУ

Басок Б. І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.05>

З застосуванням тривимірної моделі переносу теплоти в системі «грунт – горизонтальний ґрунтовий теплообмінник – теплоносіє» проведено аналіз ефективності роботи горизонтального багатопетлевого трубного теплообмінника, що є елементом теплонасосної установки. За результатами чисельного моделювання визначено залежність від часу температури теплоносія на виході з ґрунтового теплообмінника і кількості теплоти, яке вилучається з ґрунту. Результати розрахунків за наведеною моделлю задовільно узгоджуються з даними експерименту.

С использованием трехмерной модели переноса теплоты в системе «грунт – горизонтальный ґрунтовый теплообменник – теплоноситель» проведен анализ эффективности работы горизонтального многопетлевого трубного теплообменника, который является элементом теплонасосной установки. По результатам численного моделирования определена зависимость от времени температуры теплоносителя на выходе из ґрунтового теплообменника и количества теплоты, которое извлекается из ґрунта. Результаты расчетов по представленной модели удовлетворительно согласуются с данными эксперимента.

By the three-dimensional model of heat transfer in the system "ground – horizontal ground heat exchanger – heat transfer agent", an analysis of the efficiency of the horizontal multiloop heat exchanger, which is an element of the heat pump system, was carried out. Based on the results of numerical simulation, the time dependence of the heat transfer agent temperature at the outlet from the ground heat exchanger and the amount of heat extracted from the ground is determined. The results of calculations by the presented model are satisfactorily agree with the experimental data.

Бібл. 13, рис. 5.

Ключові слова: тепlopостачання, горизонтальний ґрунтовий теплообмінник, тепловий насос, акумулювання теплоти.

C , Дж/(кг·К) – теплоємність;
 d , м – температура;
 G , м³/год – витрата;
 h , м – глибина;
 K , Вт/(м·К) – лінійний коефіцієнт теплопередачі;
 Q , Вт – тепловий потік;
 T , °С – температура;
 x, y, z , м – прямокутні координати;
 δ , м – товщина;
 λ , Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності;

ρ , кг/м³ – густина;
 τ , с – час

Нижні індекси:
 0 – початковий;
 вх – вхід;
 вих – вихід;
 max – максимальний;
 г – ґрунт.

Вступ. Відповідно до вимог Енергетичної стратегії України на період до 2030 р. все більшої актуальності набувають розробка та впровадження високоефективних теплонасосних систем тепlopостачання на основі відновлюваних джерел енергії. Важливим кроком при розробці таких систем є вибір типу теплового насоса. Дослідження показують, що для першої кліматичної зони України доцільно використовувати теплові насоси типу «грунт – вода». Це пояснюється тим, що шари ґрунту, які знаходяться нижче глибини промерзання, мають стабільну температуру, близьку до +8 °С. Таким чином, тепловий насос використовує джерело низькопотенційної теплоти з практично постійним температурним потенціалом, що дозволяє досягти високого середнього за опалювальний період значення коефіцієнта перетворення енергії (COP $\geq$ 3,0).

Для теплонасосних систем тепlopостачання зас-

тосовуються два основних типи ґрунтових теплообмінників – горизонтальної або вертикальної орієнтації. При використанні горизонтальних ґрунтових теплообмінників неглибокого залягання основною проблемою є відсутність вітчизняних стандартизованих методик розрахунку їх теплотехнічних характеристик. На сьогодні такі теплообмінники проектують та впроваджують без теплофізичного обґрунтування їх оптимальних робочих параметрів.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф83/99-2018.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є нестационарні процеси теплообміну при роботі горизонтального ґрунтового колектора неглибокого залягання в складі теплонасосної системи тепlopостачан-

ня експериментальної лабораторії. Горизонтальний ґрунтовий колектор розташований на глибині 1,65 м на території ІТТФ НАН України [1]. Загальна довжина труби колектора 269 м. Внутрішній діаметр поліетиленової труби $d_{\text{вн}} = 0,028$ м. Товщина стінки труби $\delta = 0,002$ м. Теплоносій – 30% водяний розчин пропіленгліколю. Витрата теплоносія $G = 0,756$ м³/год.

Мета дослідження. Мета дослідження – вдосконалення існуючих та створення нової методики розрахунку основних параметрів горизонтальних ґрунтових теплообмінників (акумуляторів) неглибокого залягання, на основі якої, стало б можливим розрахувати оптимальну конструкцію та гідравлічний режим роботи теплообмінника в залежності від типу ґрунту, потужності теплового насоса, доступної глибини залягання та кліматичної зони.

Дослідження існуючих рішень проблеми. В літературі широко розглядаються принципові конструкції горизонтальних ґрунтових теплообмінників [2-4]. Найбільше застосування знайшли горизонтальні ґрунтові теплообмінники, а також вертикальні теплообмінники типу «труба в трубі» (коаксіальні), U-подібні (одно та багатопегльові) та об'ємні.

Для розрахунку ґрунтових акумуляторів в інженерній практиці використовуються методики, що засновані на розрахунку роботи вертикального ґрунтового теплообмінника. Дана методика, в свою чергу, заснована на рішенні задачі лінійного джерела з постійною лінійною густиною теплового потоку [5]. Аналітичне розв'язання знаходиться в вигляді нескінченного ряду і пов'язане з великою кількістю обмежень.

У роботах [6, 7] представлені результати чисельного розв'язання рівняння теплопровідності. В роботі [8] наведено моделювання процесів теплообміну в ґрунті при відборі теплоти вертикальним ґрунтовим теплообмінником. Також, чисельні методи застосовуються при розрахунках ґрунтових акумуляторів в роботах [9,10], однак в них відсутній виклад суті методик.

Складність розв'язання цієї задачі полягає в тому, що для опису процесів теплопровідності в необмеженому просторі використовується громіздкий математичний апарат. Перенос теплоти в ґрунтовому масиві описується диференціальним рівнянням теплопровідності. До нього додаються початкові і граничні умови, що і є фізико-математичним формулюванням задачі ґрунтового акумулювання теплоти. Існує ряд проблем щодо одержання аналітичного розв'язання задач ґрунтового акумулювання теплової енергії. У разі зміни у часі граничних умов для задачі переносу теплоти в необмеженому просторі виникають також проблеми з застосуванням чисельних методів. Таким чином, при вирішенні задач ґрунтового акумулювання необхідно застосовувати комбінований аналітично-чисельний метод.

Однак немає чітких рекомендацій або методик для розрахунку та підбору того чи іншого варіанту конструкції теплообмінника. Також в літературі міститься недостатньо інформації щодо експериментальних досліджень роботи ґрунтових теплообмінників.

Основна частина. Тривимірна чисельна модель температурного стану ґрунтового масиву при роботі ґрунтового колектора розглядається в розрахунковій області, що має форму прямокутного паралелепіпеда зі сторонами $x_{\text{max}} = 17$ м, $y_{\text{max}} = 34$ м, $z_{\text{max}} = 7$ м [12]. На глибині h розглянутої області розташовується горизонтальний плоский трубчастий змієвиковий теплообмінник (ґрунтовий колектор) з циркулюючим теплоносієм. Значення x_{max} , y_{max} і z_{max} вибираються так, щоб процеси теплопереносу до ґрунтового колектора мінімально впливали на температурні умови на границях розрахункової області. Температурне поле ґрунтового масиву описується рівнянням теплопровідності:

$$c_p \rho_z \frac{\partial T_z}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T_z}{\partial z} \right). \quad (1)$$

Для його розв'язання на поверхні ґрунту ($z = 0$) повинні бути задані граничні умови. У загальному випадку це можуть бути умови третього роду. У природних умовах коливання температури зовнішнього повітря, а також інтенсивності радіаційного теплообміну, призводять до зміни не тільки температури поверхні ґрунту $T_0(\tau, 0)$, а й до змін закону розподілу температури по його глибині $T_0(\tau, z)$. Але зазначені зміни спостерігаються лише до певної глибини, нижче якої температуру ґрунту можна вважати постійною (однаковою). Якщо межа розрахункової області виявляється нижче вказаного рівня, то умови на нижній межі ($z = -z_{\text{max}}$) можуть наближено вважатися умовами теплоізоляції

$$\left. \frac{\partial T_z}{\partial z} \right|_{z=-z_{\text{max}}} = 0. \quad (2)$$

На інших границях розрахункової області задаються умови, що відповідають температурному режиму ґрунтового масиву при відсутності колектора. Якщо теплоперенос в масиві пов'язаний з роботою колектора відсутній, то розподіли температури в горизонтальних перетинах масиву будуть рівномірними. Це означає, що частинні похідні від температури T_z по змінним x або y будуть дорівнювати нулю. Можна припустити, що зазначені умови приблизно виконуються на бічних границях розрахункової області при роботі колектора, якщо ці границі досить віддалені від його крайніх сегментів. В цьому випадку:

$$\left. \frac{\partial T_z}{\partial x} \right|_{x=0, x_{\text{max}}} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_z}{\partial y} \right|_{y=0, y_{\text{max}}} = 0. \quad (3)$$

Граничним умовам (2), (3) для рівняння теплопереносу в ґрунтовому масиві (1) відповідає умова відсутності надходження теплоти в розрахункову область з боку ділянок даного масиву, розташованих за її межами. При цьому, результат розв'язання задачі переносу теплоти відповідатиме умові найбільш інтенсивного охолодження даної обмеженої ділянки ґрунтового масиву.

Чисельне розв'язання нестационарної задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві виявляється достатньо проблематичним внаслідок необхідності використання сітки з крупними кроками для задачі теплопереносу в ґрунтовому масиві і дрібної сітки для розрахунку течії та теплопереносу в каналі колектора. У зв'язку з цим для складання спрощеної розрахункової схеми застосовується ряд припущень. Реальна конфігурація горизонтального ґрунтового теплообмінника замінюється системою окремих трубчастих сегментів, розташованих один до іншого під прямим кутом (рис. 1). Осі зазначених сегментів вважаються паралельними горизонтальним осям координат. Вхід теплоносія в колектор і вихід з нього визначаються координатами точок перетину осей першого і останнього сегментів колектора з граничною площиною ($y = 0$), які мають значення $z = -h$; $x = x_{\text{вх}}$ (вхід) і $z = -h$; $x = x_{\text{вих}}$ (вихід).

Вважається, що течія теплоносія в каналі – ламінарна, а профіль її швидкості – параболічний у всіх його перетинах. Деформація профілю швидкості на ділянках поворотів каналу не враховується. Передбачається, що температура на зовнішній поверхні стінки циліндричного каналу рівномірно розподілена по периметрах кіл його нормальних перетинів і змінюється лише по довжині каналу, а профілі температури в каналі

– симетричні щодо його осі. Теплофізичні властивості теплоносія і ґрунту вважаються постійними [13].

Початкові умови для поставленої задачі задаються у вигляді $T_z(0, z, y, x) = T_0(0, z)$. Функція $T_0(0, z)$ характеризує розподіл температури по глибині ґрунтового масиву в момент початку експлуатації колектора ($\tau = 0$). Температура теплоносія в каналі колектора, а також температура його стінок при $\tau = 0$ вважаються такими, що дорівнюють температурі ґрунту на глибині $z = -h$ при $\tau = 0$. Рівняння теплопровідності для ґрунтового масиву (зовнішня задача) і рівняння теплопереносу в каналі (внутрішня задача) вирішуються окремо. Узгодження одержуваних рішень здійснюється шляхом задоволення умовам спряження, що задаються на внутрішній і зовнішній поверхнях стінок каналу.

Для чисельного розв'язання рівняння теплопереносу в ґрунтовому масиві (1) використовується різницева сітка, що складається з елементів у формі прямокутних паралелепіпедів зі змінними довжинами сторін. Вузли сітки розташовуються в центрах елементів. Форму, відмінну від зазначеної, мають елементи, що безпосередньо примикають до зовнішньої поверхні стінки каналу.

Результати досліджень. Нижче наводяться результати розрахунків температурного стану горизонтального ґрунтового колектора. На рис. 2 наведено результати розрахунку зміни у часі температури теплоносія на виході з колектора. Температура теплоносія на вході в колектор визначається з експерименту та задається, як вихідна умова для розв'язання задачі теплопереносу. Температура теплоносія на виході з колектора визначається розрахунковим шляхом за результатами чисельного розв'язання задачі переносу теплоти. Значення цієї температури порівнюється з даними експериментальних

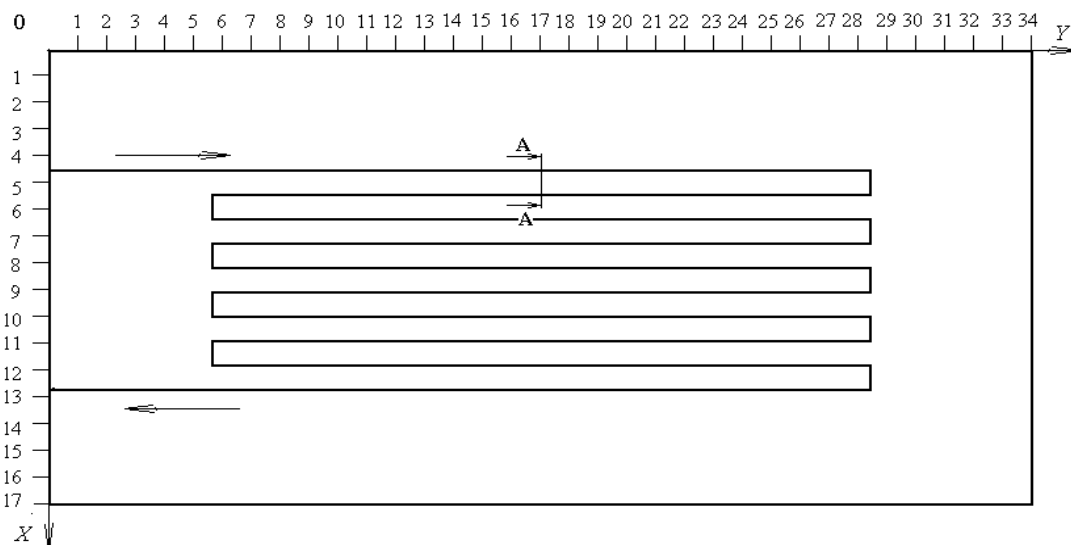
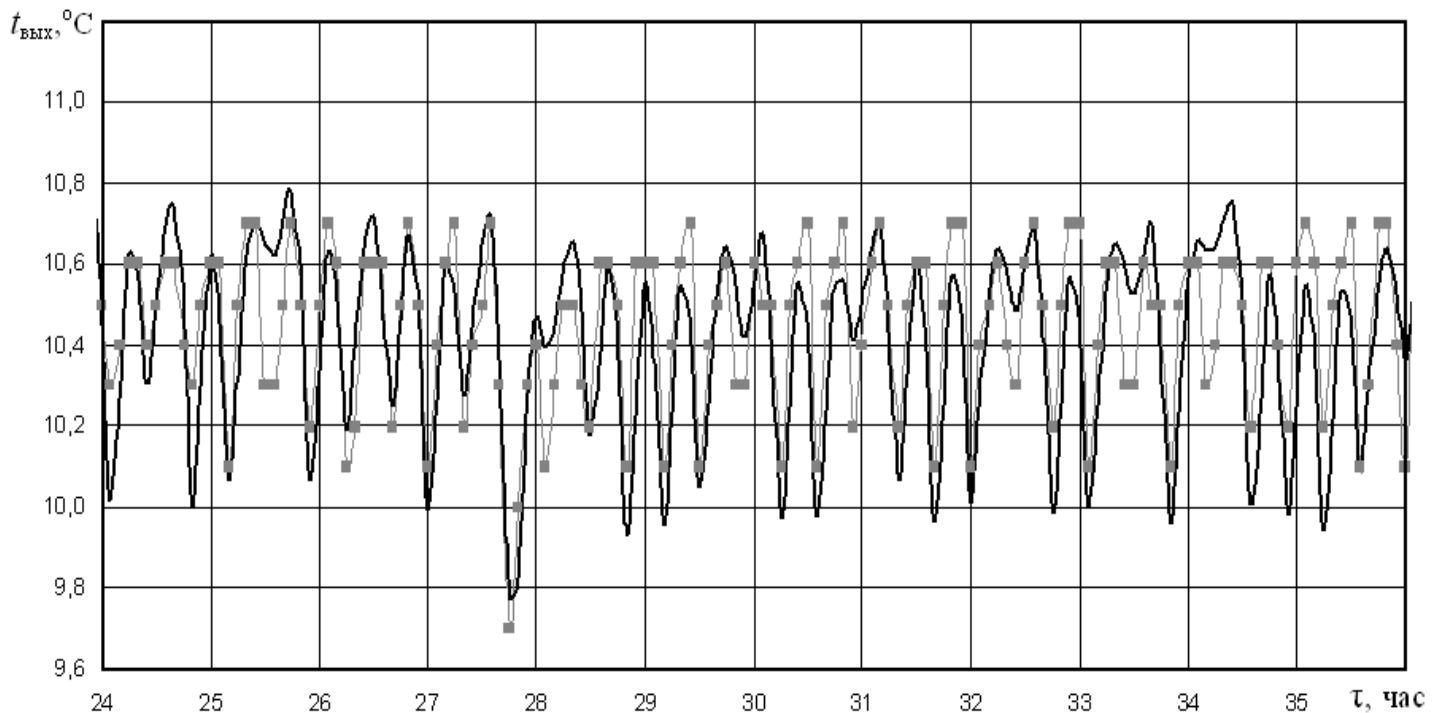


Рис. 1. Горизонтальний переріз розрахункової області на глибині залягання ґрунтового колектора ($z = 1,65$ м).



**Рис. 2. Зміна температури теплоносія на виході з колектора за період $\tau = 24 \dots 36$ годин:
точки – експеримент, суцільна лінія – розрахунок.**

досліджень, що отримані за допомогою вимірювального комплексу. Як видно з рис. 2, результати розрахунків температури на виході з колектора задовільно узгоджуються з експериментальними даними. З цього можна зробити висновок, що дана модель працює адекватно і її можливо використовувати для розрахунків горизонтальних ґрунтових колекторів неглибокого залягання.

Значення теплового потоку Q , який надходить від ґрунтового масиву до теплоносія, також суттєво змінюється у часі. Його максимальне значення становить ~ 4 кВт.

На рис. 3 відображено розподіл температури в ґрунтовому масиві по його ширині при $z = -h$; $y = 17$ м. Мінімальні значення температури відповідають ділянкам, що безпосередньо примикають до труби колектора, а максимальні – ділянкам, що розташовані посередині між сусідніми петлями колектора. Найменше значення температури ґрунту – біля найближчої до вхідного перетину петлі колектора, де температура теплоносія – найнижча.

Температурне поле у вертикальному перерізі ґрунтового масиву представлено на рис. 4. Згідно рисунку, на глибині, де прокладено колектор, спостерігається суттєва деформація температурного поля ґрунтового масиву. При $z < 2,2$ вплив колектора на розподіл температури в масиві практично не відзначається.

Оцінка ефективності роботи горизонтального колектора може бути виконана за величиною лінійного коефіцієнта теплопередачі. Зазначена величина визначається з розв'язання представленої вище задачі в умовах стаціонарного теплообміну. Вважається, що температура теплоносія на вході в колектор – постійна у часі. Температура ґрунту на границях розрахункової області також постійна у часі і рівномірно розподілена по гранях розрахункової області. Лінійний коефіцієнт теплопередачі розраховується як відношення кількості теплоти, підведеної до теплоносія в ґрунті за одиницю часу, до довжини трубопроводу і різниці між температурою ґрунту на границі розрахункової області і температурою теплоносія на вході в колектор. Залежність зазначеної величини від витрати теплоносія і товщини стінок труби представлено на рис. 5. Як видно з графіків, лінійний коефіцієнт теплопередачі зростає зі збільшенням витрат теплоносія і зменшується зі збільшенням товщини стінки труби.

Висновки

Результати розрахунків за наведеною моделлю переносу теплоти, що описує роботу ґрунтового горизонтального колектора, задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Це свідчить про можливість її використання для моделювання роботи горизонтальних ґрунтових теплообмінників подібної конструкції в

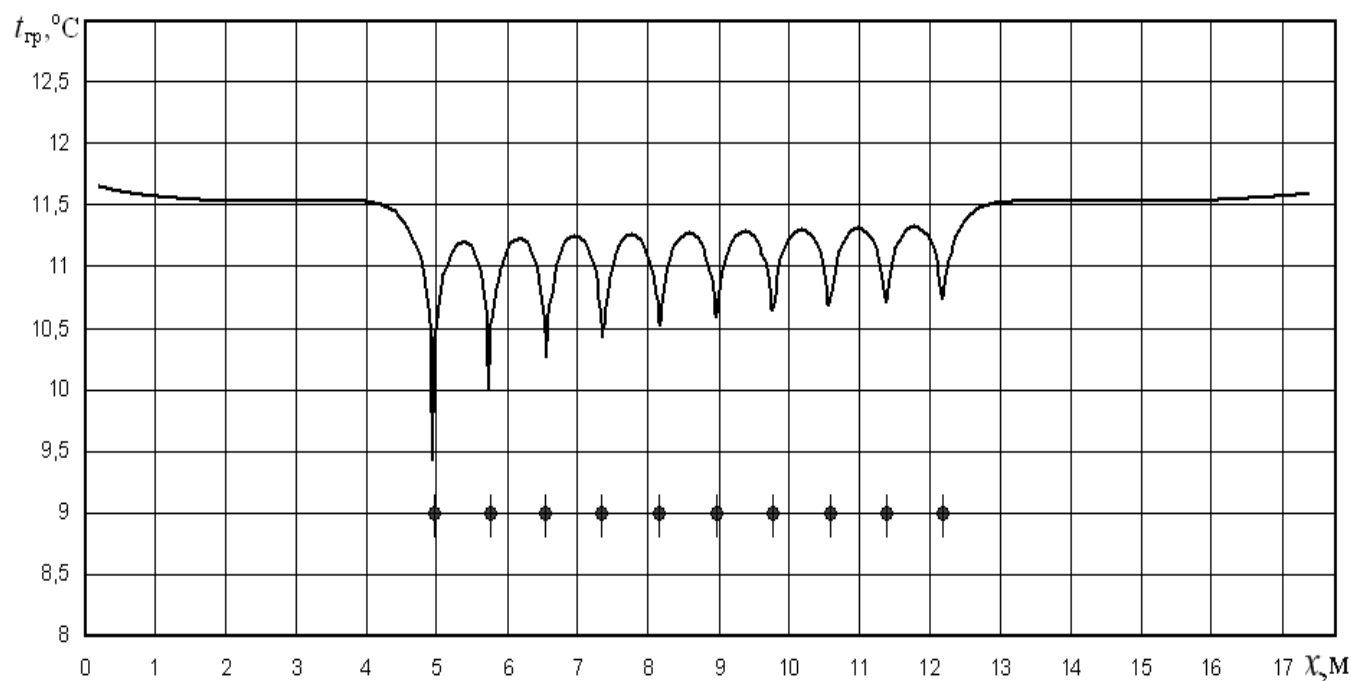


Рис. 3. Зміна температури в ґрунтовому масиві вздовж осі OX при $z = -1,65$ м; $y = 17$ м.

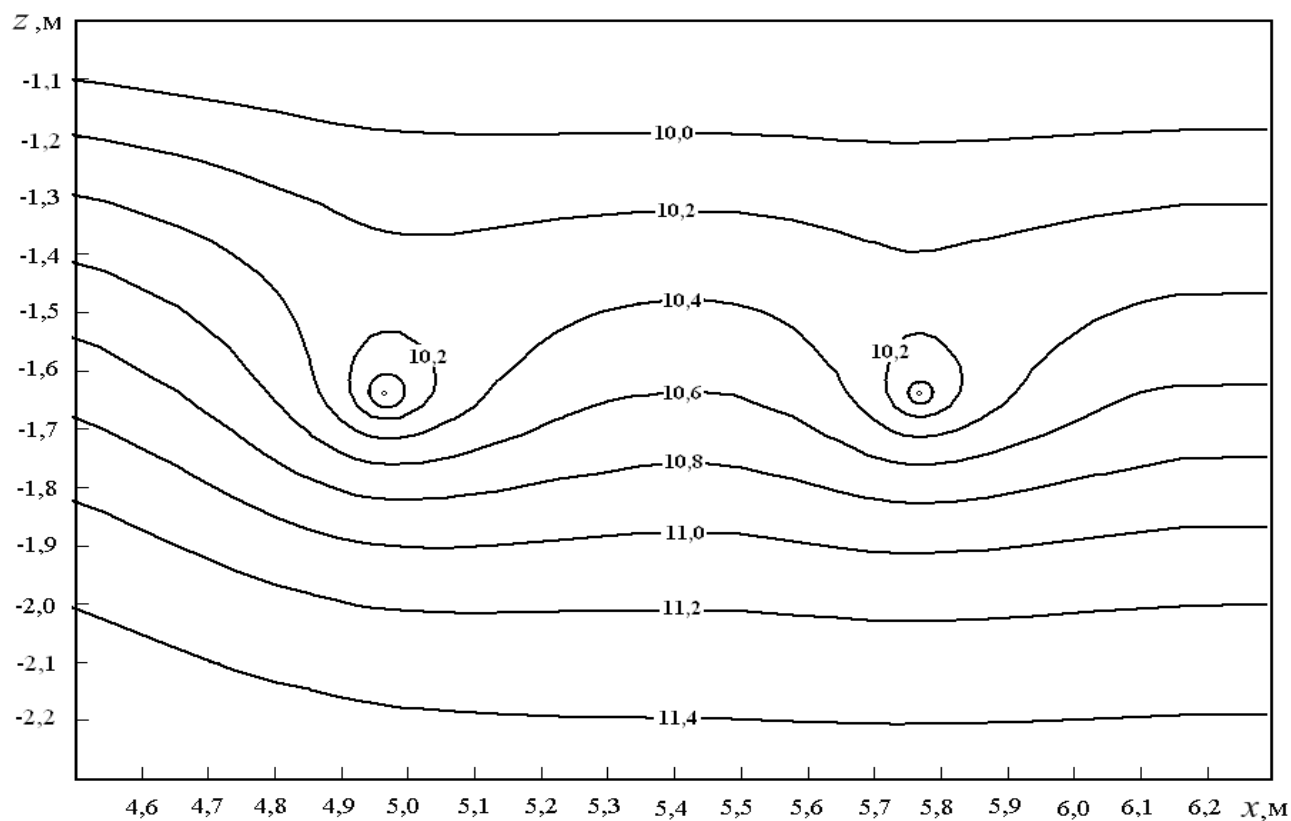


Рис. 4. Розподіл температури у вертикальному перерізі ґрунтового масиву, перпендикулярному осі OY ($y = 17$ м), в момент часу $\tau = 54$ години.

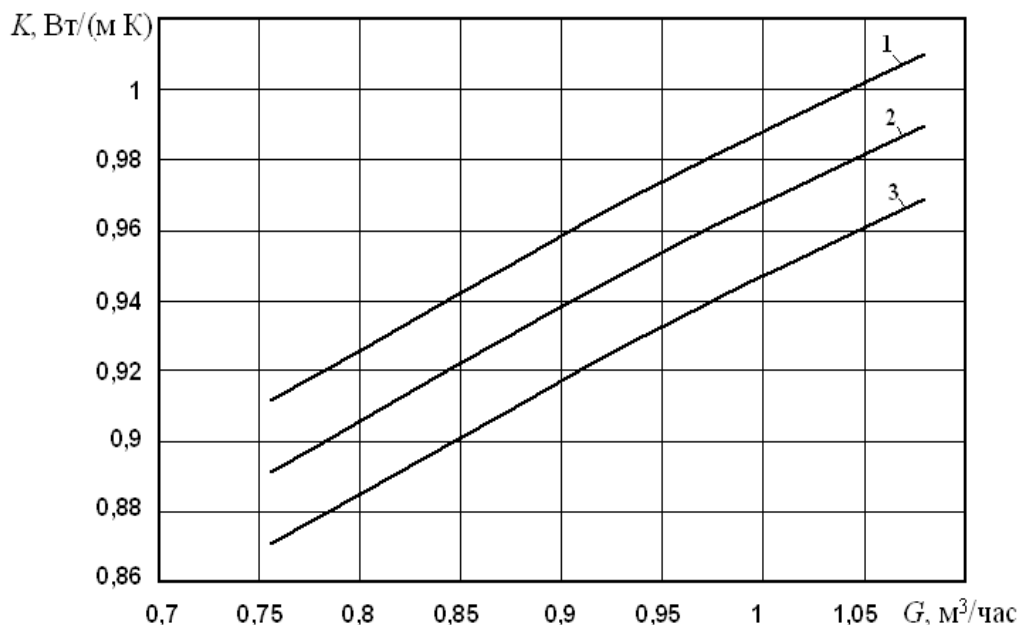


Рис. 5. Залежність лінійного коефіцієнта теплопередачі горизонтального ґрунтового колектора теплоти від витрати теплоносія і товщини стінки труби: 1 – $\delta = 1$ мм; 2 – $\delta = 2$ мм; 3 – $\delta = 3$ мм.

ґрунтах з різною геологією. За результатами чисельного моделювання встановлено вплив товщини стінки труби колектора і витрати теплоносія на його теплотехнічні характеристики. Цей вплив визначається за величиною лінійного коефіцієнта теплопередачі, який зростає зі збільшенням витрат теплоносія і зменшується зі збільшенням товщини стінки труби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А. А., Басок Б. И., Накорчевский А. И., и др. Научно-технический центр теплонасосных технологий ИТТФ НАН Украины. Пром. теплотехника. 2011. Т. 33. № 7. С. 89–91.
2. G. Florides, S. Kalogirou. - Ground heat exchangers – a review of systems, models and applications. Renewable Energy. 2007. №32. P. 2461–2478.
3. Безродный М.К., Притула Н.А. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія. Київ: НТУУ «КПІ». 2016. 272с.
4. Мазуренко А.С., Климчук А.А., Юрковский С.Ю., Омеко Р.В. Разработка схемы комбинированной системы теплоснабжения с использованием сезонного аккумулирования тепла от гелиосистем. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. №8 (73). С. 17-20.
5. Карслоу Е. Теплопроводность твердых тел. Москва. 1964. 488 с.
6. Gauthier C., Lacroix M., Bernier H. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouse. Solar Energy. 1997. V.60. №6. P. 333-346.
7. Рабинович М.Д. Исследование солнечно-теплонасосных систем теплоснабжения с сезонным баком-аккумулятором на математических моделях. Пром. теплотехника. 2000. Т.22. №1. С. 85-90.
8. Bojic M., Papadocis G., Kyritsis S. Energy from a two-pipe carth-to-air heat exchanger. Energy 1999. V.24. P. 519-523.
9. Ollson S. The Sunclay and Kullavik projects heat storage in clay at low and high temperature. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 894-898.
10. Wijsman A.I.Th.M., van Meurs. The Seasonal Heat Store in Groningen. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 886-893.
11. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия. 1971. 560 с.
12. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Лунина А.А. Численная модель температурного режима горизонтального ґрунтового колектора. Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85. №5. С. 1025–1036.
13. Басок Б.И., Воробйов Л.Й., Михайлик В.А., Лунина А.А. Теплофізичні властивості природного ґрунту. Пром. теплотехника. 2008. Т. 30. №4 С. 77-85.

UNSTEADY HEAT TRANSFER IN A HORIZONTAL GROUND HEAT EXCHANGER

Basok B.I., Davidenko B.V., Bozhko I.K., Moroz M.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.05>

The development and introduction of highly efficient heat pump systems of heat supply on the basis of renewable energy sources is becoming increasingly important in Ukraine. Two main types of ground heat exchangers are used for heat pump systems of heat supply. It is the horizontal or vertical orientation of heat exchanger.

There are number of problems for the experimental and numerical modeling of the operation of horizontal ground heat exchangers. The article presents an overview of the existing solutions to the problem and presents the results of calculations of the temperature state of the horizontal ground heat exchanger. The results of calculations describing the work of the horizontal ground heat exchanger are in satisfactory agreement with the experimental data. This indicates the possibility of their use for modeling the operation of horizontal ground heat exchangers of similar design in soils with different geologies.

Publication is based on the research provided by the grant support of the State Fund for Fundamental Research Ф83/99-2018.

References 13, figures 5.

Keywords: heat supply, horizontal ground heat exchanger, heat pump, heat storage.

1. Dolinskiy A. A., Basok B. I., Nakorchevskiy A. I. Nauchno-tekhnicheskii tsentr teplonasosnykh tekhnologiy ITTF NAN Ukrainy. [Scientific and Technical Center of Heat Pump Technologies of the ITTF of the NAS of Ukraine.] Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2011. V. 33. № 7. p. 89–91. (Rus).

2. G. Florides, S. Kalogirou. Ground heat exchangers – a review of systems, models and applications. Renewable Energy. 2007. №32. P. 2461–2478.

3. Bezrodnyy M.K., Prytula N.A. Termodynamichna ta enerhetychna efektyvnist' teplonasosnykh skhem teplopostachannya: monohrafiya. [Thermodynamic and energy efficiency of heat pump heat supply circuits: monograph]. Kyiv: NTUU «KPI» [Kyiv: NTUU "KPI"] 2016. 272p. (Ukr.).

4. Mazurenko A.S., Klimchuk A.A., Yurkovskiy S.YU., Omeko R.V. Razrabotka skhemy kombinirovannoy sistemy teplosnabzheniya s ispol'zovaniyem sezonnoy akkumulirovaniya tepla ot geliosistem. [Development of a scheme for a combined heat supply system using seasonal accumulation of heat from solar systems.]. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [Eastern European Journal of Advanced Technology]. 2015. №8 (73). p. 17-20. (Rus).

5. Karslou Ye. Teploprovodnost' tverdykh tel. [Thermal conductivity of solids]. Moskva [Moscow]. 1964. 488 p. (Rus).

6. Gauthier C., Lacroix M., Bernier H. Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouse. Solar Energy. 1997. V.60. №6. P. 333-346.

7. Rabinovich M.D. Issledovaniye solnechno-teplonasosnykh sistem teplosnabzheniya s sezonnym bakom-akkumulyatorom na matematicheskikh modelyakh. [Research of solar-heat pump systems of heat supply with a seasonal accumulator tank on mathematical models]. Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2000. V.22. №1. p. 85-90. (Rus).

8. Bojic M., Papadocis G., Kyritsis S. Energy from a two-pipe earth-to-air heat exchanger. Energy 1999. V.24. P. 519-523.

9. Ollson S. The Sunclay and Kullavik projects heat storage in clay at low and high temperature. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 894-898.

10. Wijsman A.I.Th.M., van Meurs. The Seasonal Heat Store in Groningen. E.C. Conference on Solar Heating. Amsterdam, Netherlands. 1984. P. 886-893.

11. Lykov A.V. Teplomassoobmen: Spravochnik [Heat and mass transfer: Directory]. M.: Energiya [M.: Energia.] 1971. 560 p. (Rus).

12. Basok B.I., Davydenko B.V., Lunina A.A. Chislennaya model' temperaturnogo rezhima gorizontaln'nogo gruntovogo kollektora [Numerical model of the temperature regime of a horizontal ground collector]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [Engineering and Physics Journal] 2012. V. 85. №5. p. 1025–1036. (Rus).

13. Basok B.I., Vorobyov L.Y., Mikhailik V.A., Lunina A.A. Teplofizychni vlastyivosti pryrodnoho gruntu. [Thermophysical properties of natural ground.]. Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering] 2008. V. 30. №4 p. 77-85. (Ukr.)

Отримано 25.10.2018

Received 25.10.2018

УДК 620.92

ПОБУДОВА ГРАФІКА ТРИВАЛОСТІ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ (ГРАФІКА РОСАНДЕРА) ДЛЯ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.06>

Представлено дані щодо тривалості температур зовнішнього повітря протягом опалювальних періодів 2005-2018 років в регіонах України. Наведено приклади використання отриманих даних для розрахунків. Теоретично оцінено потенціал енергозбереження при впровадженні погодозалежного регулювання виробництва теплової енергії для опалення

Представлены данные о продолжительности температур наружного воздуха в течение отопительных периодов 2005-2018 годов в регионах Украины. Приведены примеры использования полученных данных для расчетов. Теоретически оценен потенциал энергосбережения при внедрении погодозависимого регулирования производства тепловой энергии для отопления.

The data on the duration of ambient air temperatures during the heating periods of 2005-2018 in the Ukrainian regions are presented. Examples of using the received data for calculations are given. The theoretical potential of energy saving by implementation of weatherdependent regulation of heat energy production for space heating is estimated.

Библ. 7, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: графік Росандера, тривалість теплового навантаження, опалювальний період, температура зовнішнього повітря, виробництво теплової енергії.

 q – теплова потужність; Q – кількість теплової енергії; t – температура, °C; P – тривалість періоду опалення, діб; T – тривалість періоду опалення, тривалість стояння температур, год; τ – безрозмірна тривалість періоду опалення; z – частка тривалості стояння температур, вищих за +8°C, від загальної тривалості періоду опалення; K – коефіцієнт використання максимальної потужності; a ; b – коефіцієнти регресії; k – потенціал перевитрати/економії теплової енергії, %;

АРК – Автономна Республіка Крим;

Гкал – гігакалорія;

Гкал/год – гігакалорія за годину;

ТЗ-1 – температурна зона 1;

ТЗ-2 – температурна зона 2.

Вступ

Як відомо, графік Росандера, який ще називають «графіком витрат тепла по тривалості» [1] або «графіком тривалості теплового навантаження» [2], показує залежність теплових навантажень на опалення споживачів (наприклад, теплового району), розміщених у порядку зменшення, від тривалості цих навантажень, яка залежить, в свою чергу, від кліматичних характеристик опалювального періоду в тій чи іншій місцевості та встановлюється на основі багаторічних спостережень (рис. 1, а).

При цьому тривалість, що відповідає на графіку певному навантаженню, означає час, протягом якого теплове навантаження споживачів було більшим або рівним даному навантаженню. Корисною особливістю такого графіка є те, що площа під кривою в межах деякого періоду, відповідає кількості теплоти, відпущеної споживачам за цей період. На основі графіка Росандера можна побудувати інтегральну криву (рис. 1, б), що показує залежність кількості виробленої теплової енергії від потужності джерела теплової енергії.

Графік Росандера використовується для визначення кількості годин використання максимального теплового навантаження, а також у випадках, коли теплове навантаження забезпечується кількома джерелами теплової енергії – для визначення ступеня їх участі в загальному річному виробництві теплоти. Так, наприклад, якщо джерело тепловою потужністю q_1 (рис. 1) працює як основне, а джерело потужністю q_2 підключається для паралельної роботи лише коли необхідне теплове навантаження перевищує q_1 , тоді кількості теплової енергії, виробленої кожним з джерел q_1 та q_2 , будуть відповідати площам областей графіка, позначеним на рис. 1, а відповідно як Q_1 та Q_2 . Такі дані використовуються для техніко-економічної оцінки ефективності впровадження джерел теплової енергії, наприклад, нового котельного обладнання, в залежності від планованих режимів його використання.

Слід зазначити, що раніше в нормативних документах (наприклад, в посібнику до СНіП 2.01.01-82 «Будівельна кліматологія і геофізика» [3]), містилась інформація щодо тривалості стояння різних градацій тем-

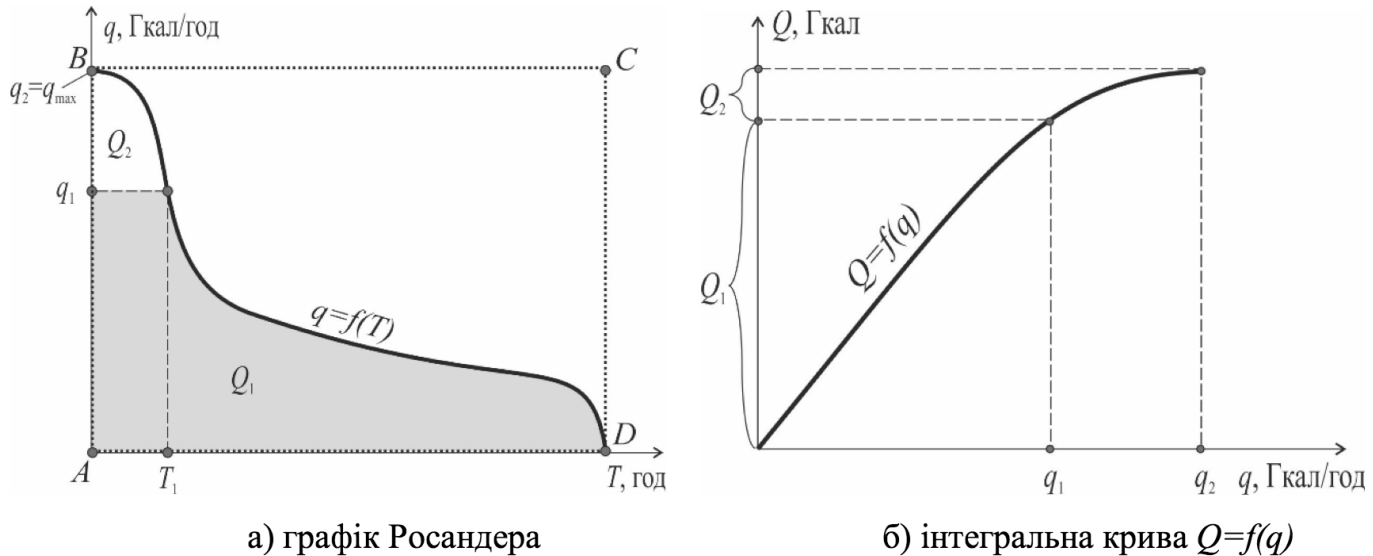


Рис. 1. Узагальнені дані опалювального періоду.

ператур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду, що дозволяла побудувати графік Росандера принаймні для деяких міст України. Але ці дані базувались на кліматичних спостереженнях, проведених в період 1925-1975 р.р., тому, враховуючи кліматичні зміни останніх десятиліть, вони видаються дещо застарілими. На жаль, державний стандарт України «Будівельна кліматологія» [4], що прийшов на заміну СНіП 2.01.01-82 та базується на більш пізніх спостереженнях, не містить даних щодо тривалості стояння різних градацій температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду.

Постановка завдання та методика проведення дослідження

Метою даної роботи є визначення тривалості стояння температур зовнішнього повітря різних градацій протягом опалювальних періодів в різних регіонах України на основі кліматичних даних метеорологічних станцій в період 2005-2018 р.р. [5] та побудова графіків Росандера для відповідних регіонів.

Для побудови графіка Росандера, залежність теплових навантажень на опалення від їх тривалості протягом періоду опалення визначалась в безрозмірному вигляді як $q = f(\tau)$, де τ є безрозмірною тривалістю стояння певної температури зовнішнього повітря, а q (безрозмірне теплове навантаження) визначалось в залежності від температури зовнішнього повітря за формулою:

$$q = (t_{\text{вн}} - t_3) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о}}), \quad (1)$$

де $t_{\text{вн}}$, t_3 , $t_{\text{р.о}}$ позначені, відповідно, внутрішня температура в опалюваних приміщеннях споживачів (прийнято

$t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$), температура зовнішнього повітря, та температура найхолоднішої п'ятиденки забезпеченістю 0,92 для даного населеного пункту, $^\circ\text{C}$. Формулу (1) легко отримати з відомої формули, за якою визначаються витрати теплової енергії на опалення [6]:

$$Q_p = Q_0 \cdot \Pi \cdot 24 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{с.о.}}) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о.}}), \quad (2)$$

де: Q_p – витрата теплової енергії за опалювальний період, Гкал;

Q_0 – максимальні погодинні витрати теплоти на опалення споживачів (при температурі зовнішнього повітря $t_{\text{р.о.}}$), Гкал/год;

$t_{\text{с.о.}}$ – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період (тобто за період зі стійкою середньою добовою температурою $+8^\circ\text{C}$ і нижче);

Π – нормативна тривалість опалювального періоду, діб; 24 – тривалість доби, год.

Поділивши обидві частини рівняння (2) на вираз $(Q_0 \cdot \Pi \cdot 24)$, та позначивши:

$$q = Q_p / (Q_0 \cdot \Pi \cdot 24), \quad (3)$$

отримаємо:

$$q = (t_{\text{вн}} - t_{\text{с.о.}}) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{р.о.}}), \quad (4)$$

де q в даному випадку означає відношення середнього за опалювальний період теплового навантаження на опалення (Гкал/год) до максимального.

Якщо у формулі (4) замість $t_{\text{с.о.}}$ прийняти t_3 як довільну температуру зовнішнього повітря в межах температур в діапазоні від $t_{\text{р.о.}}$ до $+8^\circ\text{C}$, отримаємо формулу

(1) як вираз відношення теплового навантаження на опалення при температурі t_3 до максимального теплового навантаження. Якщо проаналізувати можливий діапазон значень q у формулі (1), стане зрозуміло, що максимальне значення $q = 1$ при $t_3 = t_{p.o.}$.

Якщо позначити як T (год) тривалість опалювального періоду для даного населеного пункту, як загальну тривалість стояння температур в діапазоні від $t_{p.o.}$ до $+8^\circ\text{C}$, а тривалість стояння деякої температури зовнішнього повітря протягом опалювального періоду як T_3 (год), безрозмірна тривалість стояння даної температури зовнішнього повітря (τ) визначатиметься як:

$$\tau = T_3 / T. \quad (5)$$

Зрозуміло, що величина τ змінюється в межах від 0 до 1. Таким чином, функція $q = f(\tau)$ виражає залежність відносних теплових навантажень опалення за певних температур зовнішнього повітря, від тривалості цих навантажень, вираженої в частках від тривалості опалювального періоду для даного населеного пункту. Інтегральний графік $Q = f(q)$, побудований на основі графіка $q = f(\tau)$, виражатиме залежність безрозмірної кількості теплової енергії для потреб опалення, від відносних теплових навантажень опалення за певних температур зовнішнього повітря. Максимальне значення $Q = 1$ відповідає всій кількості теплової енергії, необхідної для опалення (наприклад, вся площа під кривою $q = f(T)$ на рис. 1, а).

Під коефіцієнтом використання максимальної потужності (K) будемо розуміти відношення кількості теплової енергії, необхідної протягом опалювального періоду, до її кількості, яка була би використана при умові, що протягом всього опалювального періоду теплове навантаження опалення дорівнює максимально. Наприклад, для умов, показаних на рис. 1, а, величина K дорівнюватиме відношенню площі під кривою $q = f(T)$ до площі прямокутника $ABCD$.

Для визначення тривалості стояння різних температур зовнішнього повітря протягом опалювального періоду, було використано кліматичні дані метеорологічних станцій, що знаходяться в обласних центрах України та столиці Автономної Республіки Крим, або якнайближче до них. Розглядалися кліматичні дані опалювальних періодів, починаючи з осені 2005 по 2018 рік. Календарні межі опалювального періоду для кожного з міст приймалися згідно таблиці 3 ДСТУ «Будівельна кліматологія», як дати переходу температур зовнішнього повітря через $+8^\circ\text{C}$. За цей період, підраховувалась кількість годин стояння різних градацій температур зовнішнього повітря в діапазоні від температури найхолоднішої п'ятиденки забезпеченістю 0,92 для даного міста (таблиця 2 ДСТУ «Будівельна кліматологія») до $+8^\circ\text{C}$, з інтервалом в 1°C .

При цьому, не всі температури зовнішнього повітря протягом опалювальних періодів були нижчими за $+8^\circ\text{C}$. Введено співвідношення (z):

$$z = \Pi_{\leq 8} / \Pi, \quad (6)$$

де $\Pi_{\leq 8}$ – тривалість періоду (в межах нормативного опалювального періоду Π), протягом якого температури зовнішнього повітря були не вищі за $+8^\circ\text{C}$.

Для обробки даних використовувалась програма Excel з програмного пакету Microsoft Office.

Результати дослідження

В результаті проведеного дослідження було знайдено тривалість стояння різних градацій температур зовнішнього повітря в опалювальний період для всіх обласних центрів України та столиці АРК. Середні дані для кожного з регіонів показано в табл.1. Тривалість стояння для кожної з температур в табл. 1 означає тривалість стояння температур, нижчих або рівних даних температурі. Таким чином, температурі $+8^\circ\text{C}$ відповідає фактична тривалість опалювального періоду в годинах.

Враховуючи суттєві кліматичні відмінності регіонів України, результати було проаналізовано окремо для двох груп регіонів, для яких, за усередненими даними, було побудовано графіки Росандера (рис. 2 і 3). Поділ регіонів на групи зроблено згідно розділення на температурні зони в Додатку В ДБН В.2.6-31:2006 [7]. До другої температурної зони (ТЗ-2) увійшли такі південні регіони України як Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька області та АРК. Всі інші регіони було віднесено до першої температурної зони (ТЗ-1).

На рисунках 2 і 3 показано залежності, отримані для регіонів, що входять до ТЗ-1 та ТЗ-2.

Отримані криві для кожної температурної зони було апроксимовано поліномами виду:

$$q = a_0 \cdot \tau^0 + a_1 \cdot \tau^1 + \dots + a_n \cdot \tau^n; \\ Q = b_0 \cdot q^0 + b_1 \cdot q^1 + \dots + b_n \cdot q^n, \quad (7)$$

де $n = 14$.

Відповідні коефіцієнти регресій, а також інші отримані результати наведено в табл. 2.

При необхідності, залежність виду $q = f(\tau)$ можна побудувати для кожного з регіонів, користуючись даними табл. 1. Залежність виду $Q = f(q)$ можна отримати шляхом визначення площі під кривою виду $q = f(\tau)$, наприклад, проінтегрувавши залежність, що описує цю криву.

Також, від залежності виду $Q = f(q)$ можна перейти до визначення кількості теплової енергії в абсолютних величинах (наприклад, в Гкал). Приведення відносної теплової потужності q (де $0 \leq q \leq 1$) до дійсного значення:

Табл. 1. Характеристики опалювального періоду регіонів України.

Міста:	Вінниця	Дніпро	Донецьк	Житомир	Івано-Франківськ	Київ	Кропивницький	Луганськ	Львів	Львів	Полтава	Рівне	Суми	Тернопіль
$t_{p.o.}, ^\circ\text{C}$	-21	-24	-22	-22	-20	-22	-22	-25	-20	-19	-23	-21	-25	-20
Π (діб)	182	172	176	184	179	176	175	172	180	179	178	182	187	178
z	0,876	0,883	0,877	0,864	0,853	0,882	0,877	0,890	0,869	0,863	0,892	0,883	0,904	0,891
K	0,496	0,461	0,491	0,474	0,500	0,477	0,482	0,455	0,493	0,504	0,480	0,494	0,470	0,507
$k, \%$	8,3	7,9	8,2	9,5	10,3	8,0	8,3	7,2	9,2	9,7	7,0	7,9	6,0	7,2
$t_3, ^\circ\text{C}$	$T_3, \text{год.}$													
-25								9					5	
-24		3						15					10	
-23		7						20			9		17	
-22		11	36	11		7	16	27			15		25	
-21	21	18	46	16		11	24	37			21	29	35	
-20	28	26	58	21	31	14	31	50	25		32	35	48	30
-19	37	36	72	30	36	19	38	67	29	20	43	43	68	39
-18	47	46	91	40	46	27	46	86	35	26	58	55	91	50
-17	59	61	114	55	54	42	57	109	44	39	74	71	117	62
-16	73	79	138	68	72	57	74	131	58	49	99	86	147	79
-15	94	102	165	86	87	76	96	163	76	65	128	109	186	100
-12	188	196	270	173	166	175	182	266	148	130	244	200	324	185
-10	299	280	354	270	247	269	274	355	222	202	353	289	433	276
-7	524	488	555	485	433	472	496	539	425	386	564	517	694	499
-5	734	685	757	666	631	654	706	755	637	592	799	746	965	718
-2	1257	1182	1264	1156	1146	1159	1209	1232	1087	1103	1318	1245	1534	1232
-1	1518	1434	1502	1397	1398	1407	1459	1446	1295	1337	1580	1483	1809	1474
0	1841	1757	1786	1690	1681	1707	1741	1708	1561	1618	1909	1802	2132	1762
1	2244	2104	2120	2082	2045	2096	2096	2020	1981	1993	2295	2203	2570	2188
2	2560	2419	2444	2419	2347	2430	2413	2342	2346	2292	2603	2540	2895	2552
3	2835	2684	2727	2705	2624	2724	2688	2639	2649	2586	2865	2829	3164	2829
5	3305	3122	3174	3225	3120	3197	3144	3125	3183	3129	3306	3321	3581	3302
8	3827	3644	3704	3814	3665	3725	3683	3675	3755	3707	3811	3856	4057	3806

Табл. 1 (продовження).

Міста:	Ужгород	Харків	Хмельницький	Черкаси	Чернігів	Чернівці	Запоріжжя	Миколаїв	Одеса	Сімферополь	Херсон	ТЗ-1(сер.)	ТЗ-2(сер.)
$t_{p.o.}, ^\circ\text{C}$	-21	-24	-22	-22	-20	-22	-22	-25	-20	-19	-23	-21	-25
П (діб)	182	172	176	184	179	176	175	172	180	179	178	182	187
z	0,876	0,883	0,877	0,864	0,853	0,882	0,877	0,890	0,869	0,863	0,892	0,883	0,904
K	0,496	0,461	0,491	0,474	0,500	0,477	0,482	0,455	0,493	0,504	0,480	0,494	0,470
$k, \%$	8,3	7,9	8,2	9,5	10,3	8,0	8,3	7,2	9,2	9,7	7,0	7,9	6,0
$t_3, ^\circ\text{C}$	$T_3, \text{год.}$												
-25													
-24													
-23		11			13								
-22		18			17								
-21		27	18	29	25		20						
-20		44	24	39	36	16	29	12					
-19		61	32	48	51	21	38	19			14		
-18	6	80	41	55	67	29	48	25	5		25		
-17	11	102	54	66	94	37	60	34	7		34		
-16	16	129	69	85	121	49	76	44	10		42		
-15	21	162	85	108	144	63	97	58	14	22	52		
-12	48	285	167	207	265	138	188	120	49	52	109		
-10	78	381	263	313	374	214	267	172	79	89	156		
-7	177	605	498	515	591	410	452	322	182	183	299		
-5	305	850	725	699	818	603	636	491	321	307	469		
-2	727	1403	1267	1182	1347	1080	1099	867	646	638	866		
-1	913	1652	1530	1426	1616	1303	1322	1041	807	802	1045		
0	1146	1931	1839	1687	1931	1584	1614	1265	1000	997	1292		
1	1459	2336	2256	2051	2384	1924	1949	1562	1243	1225	1584		
2	1713	2656	2577	2404	2724	2226	2252	1833	1506	1449	1855		
3	1973	2935	2872	2694	3004	2502	2516	2110	1794	1677	2116		
5	2477	3371	3348	3178	3452	3029	2963	2623	2360	2164	2604		
8	3080	3859	3872	3716	3986	3581	3494	3262	3162	2853	3257		

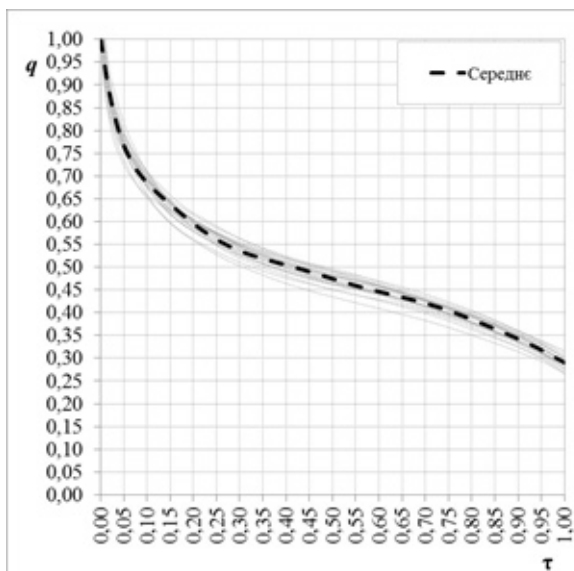
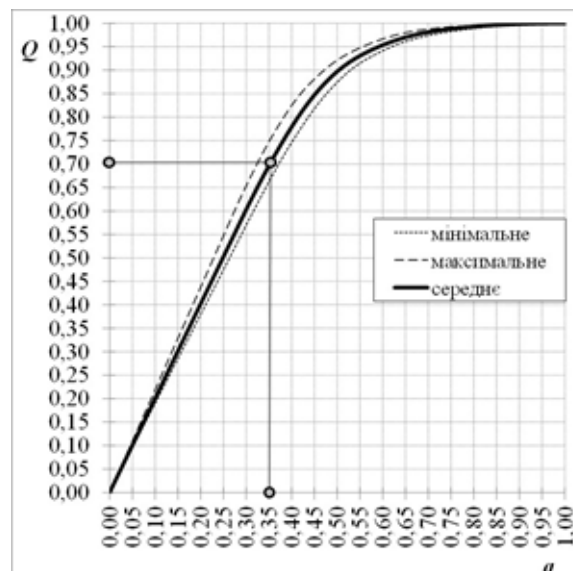
а) $q = f(\tau)$ б) $Q = f(q)$

Рис. 2. Узагальнення отриманих результатів – температурна зона 1 (ТЗ-1).

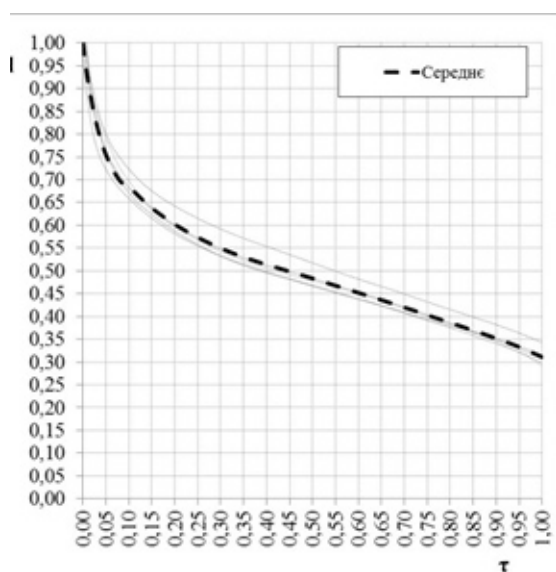
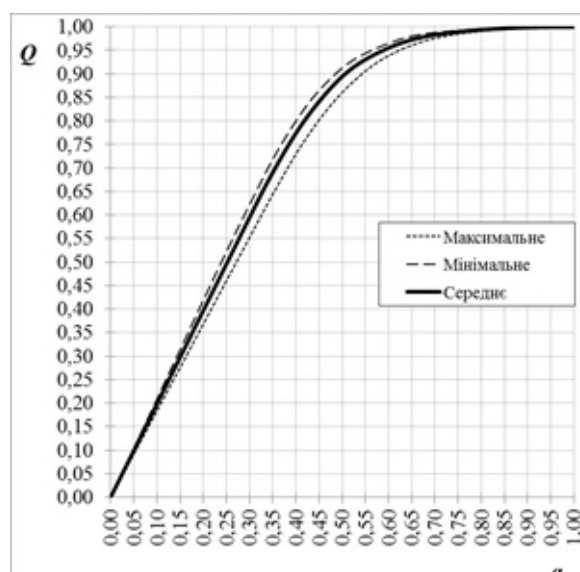
а) $q = f(\tau)$ б) $Q = f(q)$

Рис. 3. Узагальнення отриманих результатів – температурна зона 2 (ТЗ-2).

$$q_d [\text{Гкал/год}] = q \cdot q_{\max} [\text{Гкал/год}], \quad (8)$$

де $q_{\max}$ – максимальне теплове навантаження, що відповідає, в залежності від умов розрахунку, приєднаному тепловому навантаженню споживачів, або необхідній тепловій потужності джерела теплопостачання, при температурі зовнішнього повітря $t_{p.o.}$.

Дійсну кількість теплової енергії Q_d (наприклад, в Гкал), що відповідає певним значенням теплової потужності q та q_d , можна знайти за формулою:

$$Q_d [\text{Гкал}] = Q \cdot q_{\max} \cdot \Pi \cdot 24 \cdot z \cdot K. \quad (9)$$

Для прикладу, на рис. 2, б показано, що в середньому для ТЗ-1 значенню $q = 0,35$ відповідає значення $Q = 0,70$. Якщо для цього випадку значення $q_{\max}$ становить, наприклад, 10 Гкал/год, тоді кількість теплової енергії, виробленої тепловим джерелом, для якого $q = 0,35$ (теплова потужність якого становить, відповідно, $0,35 \cdot 10 = 3,5$ Гкал/год), що працює протягом сезону опалення як базове, знаходимо з виразу:

Табл. 2. Коефіцієнти регресій, що описують залежності $q = f(\tau)$ та $Q = f(q)$.

ТЗ-1				ТЗ-2			
$q = f(\tau)$		$Q = f(q)$		$q = f(\tau)$		$Q = f(q)$	
a_{14}	-629,543404	b_{14}	493,6385145	a_{14}	34,7240199	b_{14}	200,2231587
a_{13}	2581,559015	b_{13}	-1731,909724	a_{13}	0	b_{13}	-646,0717805
a_{12}	-3229,49233	b_{12}	1836,759414	a_{12}	-216,891465	b_{12}	604,5819757
a_{11}	0	b_{11}	0	a_{11}	0	b_{11}	0
a_{10}	2219,391195	b_{10}	-902,8069594	a_{10}	611,1446687	b_{10}	-154,9283598
a_9	0	b_9	0	a_9	0	b_9	0
a_8	0	b_8	384,5404788	a_8	-1120,06311	b_8	-117,9497371
a_7	-5173,14908	b_7	0	a_7	0	b_7	0
a_6	8462,562444	b_6	-44,7743098	a_6	2344,785123	b_6	379,4831631
a_5	-6310,02192	b_5	-84,72821876	a_5	-2830,95236	b_5	-408,0705204
a_4	2642,631694	b_4	61,40218105	a_4	1588,448588	b_4	172,8221711
a_3	-649,796821	b_3	-14,46223164	a_3	-486,584779	b_3	-33,96708343
a_2	93,29782772	b_2	1,374877946	a_2	82,62734603	b_2	2,98494329
a_1	-8,15737895	b_1	1,965969831	a_1	-7,9234575	b_1	1,89189038
a_0	1,008335175	b_0	0,00014769	a_0	0,997702599	b_0	0,00029339

$$Q_{д1} = Q \cdot q_{\max} \cdot \Pi \cdot 24 \cdot z \cdot K = 0,70 \cdot 10 \cdot 177,8 \cdot 24 \cdot 0,876 \cdot 0,486 = 12717 \text{ Гкал}, \quad (10)$$

де відповідні значення Π , z та K взято для середніх значень ТЗ-1 з табл. 1.

Вся кількість теплової енергії, виробленої в такій системі (тобто при $q = 1$ і $Q = 1$), становить:

$$Q_{д2} = 1,0 \cdot 10 \cdot 177,8 \cdot 24 \cdot 0,876 \cdot 0,486 = 18167 \text{ Гкал} \quad (11)$$

На основі отриманих даних щодо відношення тривалості стояння температур зовнішнього повітря в межах від $t_{p.o.}$ до $+8^\circ\text{C}$ до нормативної тривалості періоду опалення в різних регіонах (що описується величиною z), було орієнтовно оцінено внесок виробництва теплової енергії джерелами теплопостачання протягом опалювального періоду при температурах, вищих за $+8^\circ\text{C}$, тобто при умові, що таке джерело не має погодозалежного регулювання і не припиняє теплопостачання за таких температур. При цьому було прийнято, що джерело теплопостачання при температурах зовнішнього повітря, вищих за $+8^\circ\text{C}$, працює з навантаженням, що відповідає температурі зовнішнього повітря $+8^\circ\text{C}$. Теоретичне перевищення необхідної кількості виробленої теплової енергії позначено в табл. 1 величиною k (%), що показує процент перевитрати теплової енергії по-

рівняно з варіантом, коли виробництво теплової енергії відбувається лише при температурах зовнішнього повітря в межах від $t_{p.o.}$ до $+8^\circ\text{C}$. Величина k є теоретичною оцінкою можливої економії теплової енергії при усуненні так званих «перетоїв» шляхом впровадження погодозалежного регулювання при виробництві теплової енергії. В середньому для першої та другої температурної зон ця величина становить, відповідно, 8,4% та 13 %. Для врахування таких випадків, кількість теплової енергії, знайдена за формулою (11) для значення $Q = 1$ має бути скоригована шляхом множення на величину $(1+k/100)$. При паралельній роботі двох джерел теплової енергії, одне з яких є базовим, а друге – піковим, теоретична «перевитрата» теплової енергії, що характеризується величиною k , додається до теплової енергії, виробленої базовим джерелом, оскільки саме на нього припадатимуть ті частини опалювального періоду, коли можливе перевищення температури зовнішнього повітря $+8^\circ\text{C}$.

Наприклад, для випадку, розглянутого вище – див. формули (10) та (11), загальна кількість теплової енергії, виробленої за опалювальний період, визначиться з виразу:

$$Q_{д} = Q \cdot q_{\max} \cdot \Pi \cdot 24 \cdot z \cdot K \cdot (1+k/100) = 1,0 \cdot 10 \cdot 177,8 \cdot 24 \cdot 0,876 \cdot 0,486 \cdot (1 + 8,4/100) = 19693 \text{ Гкал} \quad (12)$$

Різниця порівняно з результатом розрахунку за формулою (11) становить: $19693 - 18167 = 1526$ Гкал, що додаються до виробництва «базового» джерела ($12717 + 1526 = 14243$ Гкал).

Висновки

В результаті проведеного дослідження отримано дані щодо тривалості стояння температур зовнішнього повітря різних градацій протягом опалювальних періодів в різних регіонах України. Регіони України умовно поділено на дві основні температурні зони, для яких побудовано графіки Росандера, а також інтегральні криві, що відображають частку джерела теплової енергії у її виробництві протягом опалювального сезону, в залежності від його теплової потужності. Завдяки отриманим даним, можна більш точно прогнозувати ступінь використання встановленої теплової потужності та кількість теплової енергії, що виробляється кожним з джерел теплової енергії у випадку їх паралельної роботи для потреб теплопостачання в різних регіонах України. Це дозволить, зокрема, проводити більш точну техніко-економічну оцінку результатів впровадження тих чи інших джерел теплової енергії.

На основі аналізу кліматичних даних теоретично оцінено потенціал енергозбереження при впровадженні погодозалежного регулювання виробництва теплової

енергії для потреб опалення в різних регіонах, що в середньому становить, відповідно, 8,4% для першої температурної зони (північ, центр) та 13% для другої зони (південь).

Результати проведеного дослідження надалі можуть бути уточнені шляхом обробки кліматичних даних за більш тривалий період.

ЛІТЕРАТУРА

1. Козин В.Е и др. Теплоснабжение. М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
3. *Справочное пособие* к СНиП 2.01.01-82 «Строительные климатология и геофизика». НИИСФ Госстроя СССР.
4. *ДСТУ-НБ В.1.1-27:2010* «Будівельна кліматологія». К.: Мінрегіонбуд України, 2011.
5. *Режим доступу*: <http://rp5.ua>.
6. *КТМ 204 Україна 244-94* Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні.
7. *ДБН В.2.6-31:2006* Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. Зміна No1. ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій».

DETERMINATION OF LOAD DURATION CURVE (ROSSANDER GRAPH) FOR THE REGIONS OF UKRAINE

Kramar V.G.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.06>

The purpose of this work is to determine the duration of the ambient air temperatures of different gradations during heating periods in different regions of Ukraine, based on the climatic data for 2005-2018 and the construction of load duration curves for the respective regions. The load duration curve (Rossander graph) is used to determine the number of maximum thermal load using hours, as well as in cases where the thermal load is provided by several sources – to determine their level of participation in the total annual heat energy production. It is important for a more accurate technical and economic evaluation of implementation results for some thermal energy sources. The climatic data of meteorological stations located in the regional centers of Ukraine and the capital of Autonomous Republic of Crimea, or as close as possible to them, were used for the study. The climatic data of heating periods from the autumn of 2005 to 2018 were considered. As the result of study, the duration of various degrees of ambient air temperature in the heating period was determined for all the regional centers of Ukraine. Taking into account the significant climatic differences in the regions of Ukraine, the results were analyzed separately for two groups of regions, for which, according to averaged data, load duration curves were determined. The examples of using of obtained results for calculations are given. On the basis of obtained data regarding duration of ambient temperatures higher than $+8^{\circ}\text{C}$ during the heating season, the energy saving potential of implementation of weather-dependent regulation of heat energy production for heating purposes in different regions was theoretically estimated, which is, on average, 8.4% for the first temperature zone (north, center) and 13% for the second zone (south).

References 7, table 2, figure 3.

Key words: Rossander graph, duration of thermal load, heating period, ambient air temperature, thermal energy production.

1. Kozin V.E et. al. Teplosnabzhenie [Heat supply]. M.: Vyssh. shkola, 1980. – 408 s. (in Rus).
2. Sokolov E.YA. Teplofikatsiya i teplovye sety [District Heating and heat supply networks]. M.: Izd-vo MEI, 2001. – 472 c. (in Rus).
3. Spravochnoe posobie k SNiP 2.01.01-82 «Stroitelnye klimatolohyya i heofizika» [Reference book to SNiP 2.01.01-82 "Construction Climatology and Geophysics"]. NIISF Hosstroya SSSR. (in Rus).
4. DSTU-N B V.1.1-27:2010 «Budivelna klimatolohiya» [State Standard of Ukraine "Construction Climatology"]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. (in Ukr).
5. Mode of access: <http://rp5.ua>
6. KTM 204 Ukraina 244-94 Normy ta vkazivky po normuvannyu vytrat palyva ta teplovoyi enerhiyi na opalennya zhytlovykh ta hromadskykh sporud, a takozh na hospodarsko-pobutovi potreby v Ukrayini [Norms and guidelines for standardization of fuel and heat energy costs for the heating of residential and public buildings, as well as for household and domestic needs in Ukraine]. (in Ukr).
7. DBN V.2.6-31:2006 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Teplova izolyatsiya budivel. Zmina No1 [State Building Codes "Constructions of buildings and structures. Thermal insulation of buildings". Change No. 1]. DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnnykh konstrukttsii». (in Ukr).

Отримано 03.07.2018

Received 03.07.2018

УДК 661.72

СВІТОВИЙ ТА ВІТЧИЗНЯНИЙ ДОСВІД ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Долінський А.А., академік НАН України, Ободович О.М., докт. техн. наук,
Сидоренко В.В., канд. техн. наук.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.7>

В статті зроблено огляд стану виробництва біоетанолу в світі та в Україні станом на 2018 рік. Описано технології виробництва біоетанолу з рослинної сировини, розглянуто основні способи попередньої підготовки сировини до гідролізу та відповідне обладнання. Зроблено припущення про перспективу вдосконалення технології отримання біоетанолу шляхом застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії на етапі попередньої підготовки сировини до гідролізу.

В статье сделан обзор состояния производства биоэтанола в мире и в Украине по состоянию на 2018 год. Описаны технологии производства биоэтанола из растительного сырья, рассмотрены основные способы предподготовки сырья к гидролизу и соответствующее оборудование. Сделано предположение о перспективе совершенствования технологии получения биоэтанола путем применения метода дискретно-импульсного ввода энергии на этапе предподготовки сырья к гидролизу.

The article gives an overview of the state of bioethanol production in the world and in Ukraine by 2018. The technologies of bioethanol production from plant raw materials are described, the main methods of pretreatment of raw materials for hydrolysis and related equipment are considered. An assumption is made about the prospect of improving the technology of obtaining bioethanol by using the method of discrete-pulse energy input at the stage of pretreatment of raw materials for hydrolysis.

Бібл. 15, рис. 2.

Ключові слова: біоетанол, лігноцелюлозна біомаса, попередня підготовка.

Вступ

Використання відновлюваних джерел енергії є одним із найбільш важливих напрямів енергетичної політики України, спрямованої на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів та поліпшення стану оточуючого природного середовища. Як зазначається в Національному плані дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року, збільшення обсягів використання відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі України дасть змогу підвищити рівень диверсифікації джерел енергоносіїв, що сприятиме зміцненню енергетичної незалежності держави. В транспортній сфері використання відновлюваних джерел енергії полягає в поступовому збільшенні виробництва альтернативних видів палива, а саме біодизелю біоетанолу.

1. Стан виробництва біоетанолу в світі.

Згідно з даними Renewable Fuels Association світове виробництво біоетанолу (Fuels Ethanol) в 2017 р. склало більш ніж 27,000 млн. галонів (80 млн. тонн) [1]. Провідна країна в цій галузі, США після стрімкого злету виробництва біоетанолу в першому десятиріччі нового століття (в 8 разів), та незначного падіння в 2011-2012 р. останні роки знову демонструє впевнене зростання. Вісім країн світу, а саме США, Бразилія, країни ЄС, Китай, Канада, Таїланд, Аргентина, Індія разом виробляють близько 98% біоетанолу, решта світу – тільки 2% (1,38 млн. т/рік).

Стратегію та перспективи розвитку виробництва біопалив, в тому числі біоетанолу окреслено в так зва-

ний технологічний дорожній карті (Technology Roadmap Biofuels for Transport), яку опубліковано в 2011 році Міжнародним агентством по енергетиці (International Energy Agency) [2].

Виробництво етанолу в якості добавки до бензину, відносно сировини, що використовується, а також відповідних технологій, історично поділяється на три покоління. Біопаливо першого покоління виробляється з продовольчих культур, що багаті цукром (цукровий буряк, цукрова тростина тощо) або крохмалем (кукурудза, пшениця).

Біопаливо другого покоління (Second-generation biofuels, advanced biofuels) виготовляється з сировини, непридатної для харчового споживання або з лігноцелюлозної біомаси (lignocellulosic biomass), до якої відносяться побічні сільськогосподарські продукти (кукурудзяні стеблі, лушпиння, відходи лісного господарства, багатолітні трави (просо), муніципальні відходи тощо).

До біопалива третього покоління відносять зазвичай біопаливо, що виробляється з водоростей.

Наразі виробництво біопалива першого покоління є домінуючим і на 2011 р. складало 99,85% всього біопалива в світі. За даними International Energy Agency в короткостроковій перспективі очікується, що обсяг виробництва біопалива з непродовольчої сировини буде скромним, оскільки для його підвищення необхідно домогтися прогресу в технологіях [3].

2. Стан виробництва біоетанолу в Україні.

Питання впровадження біологічних видів палива в

Україні знайшли відображення в ряді нормативно-правових актах таких, як Закони України "Про альтернативні джерела енергії та "Про альтернативні види рідкого та газового палива".

Ще у 2012 році прийнято Закон України "Про внесення змін до деяких законів України щодо виробництва та використання моторних палив з вмістом біокомпонентів", яким запроваджено обов'язковий вміст біоетанолу в бензинах моторних, що виробляються та/або реалізуються на території України.

Попередні розрахунки щодо використання джерел відновлюваної енергії, в тому числі біопалива, у транспортному секторі на 2014-2020 роки містяться у Розпорядженні Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 р. № 902-р "Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [4].

Згідно з планом оцінка загального внеску біоетанолу очікувалась в розмірі 150 тис. тонн нафтового еквіваленту в 2015, 200 (2016), 225 (2017), 250 (2018), 280 (2019), 320 (2020). Після приєднання України до договору про заснування Енергетичного співтовариства у нашої держави виникли зобов'язання щодо імплементації Директив ЄС 2009/28/ЄС про запровадження біопалива, яка вимагає до 2020 року наростити частку біоетанолу в автомобільному паливі до 10%. Наразі в Україні частка біоетанолу складає <1%.

До 2015 р. розвиток біоетанольного напрямку стримувався монополією на виробництво цього виду палива та надмірною зарегульованістю. Однак у 2015 році Міністерство аграрної політики і продовольства зробило важливий крок з дерегуляції, який був націлений активізувати розвиток ринку альтернативних видів палива в Україні. Зокрема, Кабінетом міністрів прийнято постанову №319 від 20 травня 2015 року «Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2007 №1375», яким виключений перелік спиртових заводів, що мають право на виробництво біоетанолу. Досить вагомою мотивацією для подальшого розвитку цього напрямку є зняття державної монополії на виробництво біоетанолу [5]. Окрім спиртових заводів Концерну "Укрспирт" та ДП "Укрспирт" на цукрових заводах України приватними інвесторами будуються цехи по виробництву біоетанолу з меляси.

Щорічне споживання бензину в Україні становить близько 5 млн. т. Власний видобуток нафти забезпечує тільки 20 % цієї кількості, інша частина виробляється з імпоротної сировини.

За даними Міністерства аграрної політики та продовольства України, обсяг виробництва біоетанолу спиртовими заводами, що входять до складу Концерну "Укрспирт" та ДП "Укрспирт" склали: в 2015р. – 958,3; в 2016р. – 1071,2; в 2017р. – 2992,8 та за перше півріччя 2018 р. – 1512,0 тис. дал., що відповідає 4,841; 5,411; 15,118 та 7,638 тис. тонам нафтового еквіваленту

відповідно. Слід зазначити, що ці дані не включають обсяги виробництва біоетанолу виробниками, що не належать до сфери управління Мінагрополітики.

З 26.10. 2016 ПАК Укрнафта реалізує на ринку "Топливо моторное смесевое альтернативное марки ЕСО 95Е50 SUPER" (ТУ У 20.5-008:2014) за ціною 30400,00 грн/т (на 25.07.2018 р.), що більш ніж на 10% дешевше за бензин А-95-Євро5-Е5.

Серед перспективних розробок Національної академії наук України є такі, що пов'язані з удосконаленням технологій отримання біоетанолу. В Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України йде робота в напрямку пошуку сортів альтернативних культур для отримання біоетанолу (сорго, коракани тощо), Інститут біології клітини НАН України пропонує рекомбінантний штам дріжджів (*Ogataea* (*Hansenula*) *polymorpha*) для отримання біоетанолу, в НАН України багато уваги приділяється виробництву біодизелю [6].

3. Технологія отримання біоетанолу.

Відомі економічні розрахунки собівартості біоетанолу з зерна та деревини. В структурі собівартості етанолу з зерна витрати на сировину і ферментні препарати складають 62 – 70%. В гідролізному виробництві етанолу з відходів від переробки деревини витрати на сировину – близько 12% його собівартості. Високий відсоток витрат на сировину в першому випадку можна пояснити низькою витратою тепло енергоресурсів, а також високими витратами на ферментативні препарати – 5% від повної собівартості. В другому випадку найбільші витрати складають тепло енергоресурси – 40% та постійні витрати - близько 40% [7]. Виробництво етанолу зазвичай проводиться в три основні етапи: (1) отримання розчину, що містить ферментативні цукри, (2) ферментаційна конверсія цукрів в етанол і (3) розділення та очищення, як правило шляхом перегонки-ректифікації-дегідратації. Процес бродіння може використовувати будь-який цукристий матеріал для отримання етанолу.

Для отримання етанолу з лігноцелюлозної сировини на даний час використовуються декілька технологій, які можна поділити на дві основні групи – термохімічна конверсія та біохімічна конверсія (рис.1). Перша пов'язана з отриманням синтез газу з подальшою конверсією в біопаливо завдяки металокаталітичним або біокаталітичним методам і в даній статті не розглядатиметься.

Процес отримання біоетанолу з лігноцелюлозної сировини в другій групі складається з трьох основних елементів – попередньої обробки, ферментативного гідролізу і ферментації. Етапи процесу також включають збір, обробку, відновлення (recovery) та транспортування сировини, подрібнення сировини для отримання дрібних і однорідних часток, фракціонування

полімерів, відділення лігніну и кінцеве відновлення продукту. Крім того, може проводитись знезараження і ферментація виділених на етапі попередньої обробки пентоз. Целюлоза піддається гідролізу для отримання гексоз, таких як глюкоза.

Всі способи переробки сировини можна розділити на три групи: механічні (розмелювання), хімічні (кон-

версія), біологічні (біоконверсія). В біотехнології, як правило, всі ці способи поєднуються. Класифікація найбільш поширених способів наведена на рис. 2.

Процес попередньої обробки є основною складовою витрат у загальному процесі [8]. Досить немає "найкращого" варіанту, тому дослідження та розробки продовжують вдосконалювати цільові показники та по-

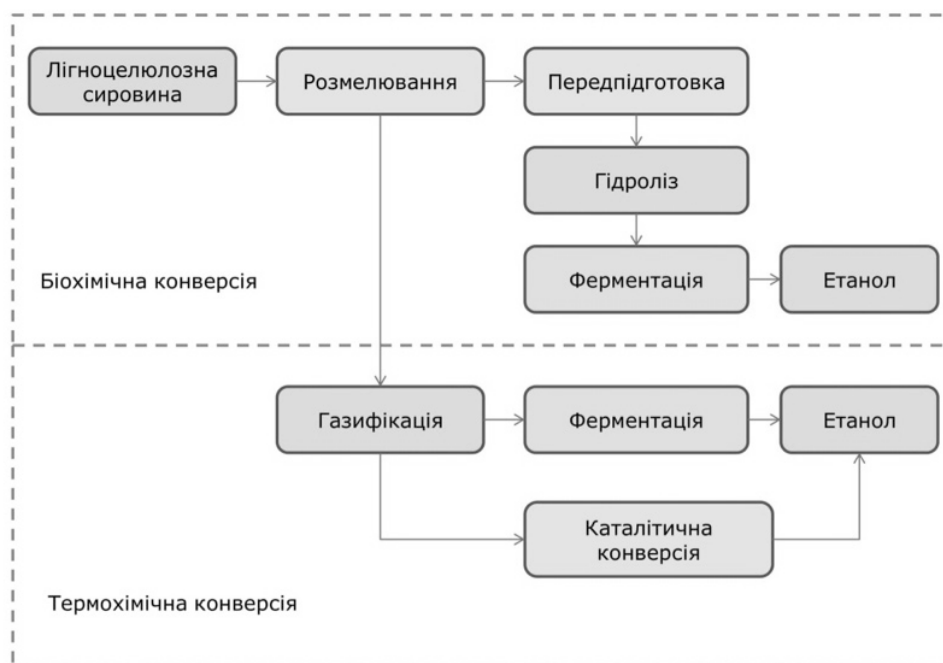


Рис. 1. Групи технологій отримання етанолу з лігноцелюозної сировини.

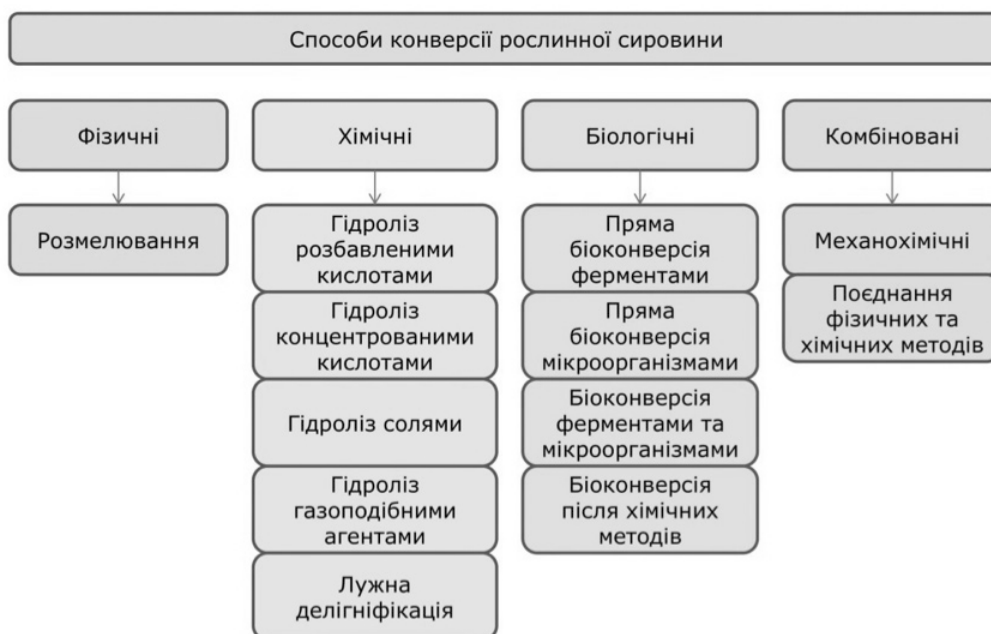


Рис. 2 Способи переробки рослинної сировини.

казники ефективності, хоча паровий вибух та обробка розведеними кислотними розчинами є, ймовірно, найближчими до комерціалізації [9].

Основними цілями процесу попередньої обробки є:

- зменшення розмірів часток сировини;
- розділення основних компонентів сировини (геміцелюлоза, целюлоза, крохмаль);
- забезпечення кращого доступу гідролітичних ферментів (при ферментативному гідролізі) до поверхні матеріалу;
- зменшення ступеню кристалічності целюлозної матриці [10].

Підкреслюється, що процес попередньої обробки запобігає передчасному розкладанню отриманих цукрів; запобігає появі інгібіторів перед гідролізом та ферментацією; знижує вартість обробки; знижує енерговитрати в цілому.

Перспективними с точки зору ефективності попередньої обробки сировини до гідролізу є саме комбіновані (див. рис. 1) [7].

Механохімічні методи попередньої обробки сировини полягають в поєднанні механічного подрібнення з дією хімічних речовин за наявності або без рідкої фази.

До механохімічних методів відносять екструзію. У порівнянні зі звичайним подрібненням, екструзія є більш ефективним способом обробки. При екструзії рослинна сировина піддається механічному та навіть хімічному деформуванню, після чого, за рахунок різниці тисків в екструдері і в атмосфері, гомогенна маса спучується і утворюється продукт з мікропористою структурою.

Відомий дифібраційний спосіб попередньої обробки, що відбувається в апаратах типу “дефібратор” або установках гарячого помелу. В основі цього способу лежить розмелювання сировини (технологічної луски) на дискових млинах з метою отримання деревоволокнистої маси. Тріску, попередньо оброблену сірчаною кислотою (0,5...10,0 %) пропарюють гострою насиченою парою під тиском 0,78...1,18 МПа з температурою 17...190 °C. Час пропарювання варіює від 1 до 5 хв. Пропарена тріска надходить для розмелювання в дисковий млин, ступінь розмелювання визначається відстанню між дисками робочого органу [11].

Не так давно набув розвитку бісульфітний метод передобробки деревинної сировини (SPORL). В цьому процесі деревинна біомаса (chips) спочатку реагує з 1...9 % розчином бісульфіту натрію (кальцію, магнію тощо) за температури 160...190 °C та pH 2...5 впродовж 10...30 хв. Заздалегідь оброблена деревинна біомаса подрібнюється в дисковому млині (disk refiner) з додаванням води для створення волокнистого субстрату для подальшого оцукрювання та ферментації. Ефект методу SPORL полягає в розчиненні геміцелюлози, деполімеризації целюлози, часткової делігніфікації,

часткової сульфонування лігніну та збільшенням площі поверхні за рахунок надання сировині волокнистої структури у дисковому млині. Показано, що попередня обробка SPORL збільшує вихід цукру (від 57% до 88%) та знижує інгібітори на 65% порівняно з попередньою обробкою хвойних порід з розведеною сірчаною кислотою [12].

Фізико – хімічні методи попередньої обробки також мають широке застосування. Сутність цих методів полягає у впливі на середовище, що обробляється, фізичних факторів. Найбільш відомим способом є метод парового вибуху (steam explosion), що передбачає поєднання гідротермічної обробки з різкою зміною тиску. Спочатку біомаса піддається впливу високої температури і тиску протягом від декількох секунд до декількох хвилин, потім відбувається процес скидання тиску, внаслідок якого пара викликає розрив волокон біомаси. Додатково відбувається процес автогідролізу. За автогідролізу сировина піддається дії водяної пари. Каталізатором процесів гідролізу геміцелюлоз та целюлози слугує оцтова кислота, що за таких умов обробки (235 °C, 4,34 МПа, 0,5...2 хв.) відщеплюється від полісахаридів. Такий самий принцип має метод із використанням аміаку замість водяної пари (ammonia fibre explosion), що відбувається при меншому тиску. Гідротермічна обробка передбачає обробку сировини (гідромодуль 1:7) за температури 170...200 °C та тиску до 2 МПа впродовж 10...15 хв. До фізико-хімічних методів належать також радіоліз в атмосфері CO₂, використання надкритичних флюїдів, обробка ультразвуком тощо.

Безпосередньо процес гідролізу, тобто конверсія целюлози в глюкозу, відбувається трьома основними методами:

- перколяційний гідроліз розбавленими кислотами (H₂SO₄ до 1%) під підвищеним тиском (1...1,2 МПа) та температурі (≈ 200 °C). Наразі цей метод в світі майже не використовується;
- гідроліз концентрованими кислотами (H₂SO₄ 40...70%), при температурі (до 70 °C) впродовж кількох годин;
- ферментативний гідроліз за температури (≈ 50 °C) протягом декількох днів [8].

Нинішня тенденція спрямована на ферментативний гідроліз, щоб уникнути дорогих процесів відновлення і очищення стічних вод в результаті використання кислоти. Ферментативний гідроліз є привабливим, оскільки він дає кращий вихід, ніж кислотний, в той час як виробники ферментів використовуючи біотехнологію, останнім часом значно скоротили витрати на їх виробництво.

4. Обладнання для попередньої обробки лігноцелюлозної сировини в технології отримання біоетанолу.

При попередній обробці, деревинна сировина перед

хімічної конверсії подрібнюється на рубільних машинах, молоткових дробарках, молоткових млинах, при обробці відходів від переробки сільськогосподарської продукції (кукурудзяної качана, бавовняного лушпиння тощо) застосовують їх вальцювання на вальцових дробарках.

При комбінованому (дефібраційному) способі для пропарювання і розмелювання тріски використовуються дефібратори, що складаються з приймальні воронки, шнекового живильника, пропарювальної камери з мішалкою, внутрішнього шнекового живильника з регульованою швидкістю обертання, розмельної камери, випускного пристрою, системи змачування підшипників, гідравлічної системи притиску дисків. Це обладнання використовується зокрема при виробництві деревноволокнистих плит. В розмельній камері знаходяться нерухомий та рухомий диски. Потрапляючи через центральний отвір нерухомого диска на обертую шайбу, тріска відкидається в зону розмелу. Робочі поверхні дисків забезпечені канавками і рифленнями в яких і відбувається перетирання прогрітих деревних частинок на окремі волокна і пучки волокон. Під дією відцентрових сил і тиску пари утворюється волокниста маса, що викидається з дисків назовні за допомогою спеціальної клапанної системи. Зазор між дисками регулюється.

В методі SPORL застосовується дисковий млин (disk refiner), що діє за таким самим принципом.

Пошук нових та удосконалення відомих технологій обробки рідких гетерогенних систем в харчовій, фармацевтичній промисловості, енергетиці із застосуванням масообмінного обладнання, що реалізує метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) проводиться відділом тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики НАН України під керівництвом академіка Долінського А.А. До робіт, пов'язаних з темою статті, слід віднести роботи по вдосконаленню технології приготування сусла спиртового виробництва додаванням в технологічну схему роторно-пульсаційного апарату (РПА) [13]. Застосування РПА дозволило знизити загальні енерговитрати на 30%; скоротити тривалість процесу в 2; зменшити втрати зброджених речовин від 8...10% до 2...4%; збільшити вихід спирту з одиниці сировини на 1,5...3,0 %.

Останнім напрацюванням в області застосування РПА були дослідження по впливу гідродинамічних та фізичних ефектів, що відбуваються в РПА на структуру крохмалевмісної сировини в технології отримання рідких гомогенізованих кормів для с/г худоби. [14].

В результаті роботи встановлено, що використання РПА в технології приготування рідких кормів для сільськогосподарських тварин дозволяє знизити енергоємність процесу в 2 ...3 рази в порівнянні з традиційною технологією, а також збільшити продуктивність

на 10...15% по готовому продукту. Розрахунок економічного ефекту від впровадження установки для приготування рідких кормів за рахунок енергозбереження і економії сировини і матеріалів становить 50 тис. грн. / рік на 100 голів.

Метод ДІВЕ та РПА було використано в технології приготування рідких кормів на основі целюлозовмісних відходів рослинної сировини. В результаті роботи визначено, що застосування РПА в цій технології дозволяє знизити тривалість процесу в 2 рази [15].

Висновки

Виробництво біоетанолу другого покоління в порівнянні з біоетанолом з крохмалевмісної сировини наразі залишається енерго- та ресурсозатратнішим завдяки особливостям структури целюлозовмісної сировини. Поєднання декількох методів обробки целюлозовмісної сировини в процесі попередньої обробки при підготовці до гідролізу (кислотного або ферментативного) дозволяють збільшити ступінь конверсії біомаси та вихід продукту (біоетанолу) завдяки зменшенню ступеню кристалічності целюлозної матриці, розділенню основних компонентів сировини, забезпеченню кращого доступу гідролізу для гідролітичних ферментів (при ферментативному гідролізі) до поверхні матеріалу. Незважаючи на те, що комбіновані методи попередньої обробки в деяких випадках компенсують енергетичні витрати, пов'язані з етапом помелу, виробництво біоетанолу другого покоління надалі залишається енерговитратнішим, ніж виробництво біоетанолу з крохмалевмісної сировини. Виходом може бути вдосконалення технології шляхом застосування енергоефективного обладнання, що працює за принципом ДІВЕ і дозволить інтенсифікувати процес попередньої підготовки сировини до гідролізу без збільшення енерго- та ресурсовитрат.

ЛІТЕРАТУРА

1. *World Fuel Ethanol Production* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#E0>
2. *Technology Roadmap - Biofuels for Transport*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-biofuels-for-transport>
3. *Technology Roadmap - Biofuels for Transport*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.iea.org/tcep/transport/biofuels>
4. *Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про Національний план дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року"* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>
5. *Блюм Я.Б.* Біологічні ресурси і технології для виробництва різних видів біопалив (наукова конференція

"Біологічні ресурси і новітні біотехнології виробництва біопалив") / Я. Б. Блюм, О. М. Левчук, Д. Б. Рахметов, С. Д. Рахметов // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – № 11. – С. 64-72.

6. Довідкове видання "Перспективні науково-технічні розробки НАН України" (2017) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nas.gov.ua/RDOutput/UA/book2017/Pages/Default.aspx>

7. Сушкова В.И. Методы подготовки растительного сырья к биоконверсии в кормовые продукты и биоэтанол / В.И. Сушкова, Л.В. Устюжанинова, О.В. Березина, С.В. Яроцкий // Химия растительного сырья. – 2016. – №1. – С.93-119.

8. *Mustafa Vohra, Jagdish Manwar, Rahul Manmode, Satish Padgilwar, Sanjay Patil* Bioethanol production: Feedstock and current technologies *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (2014) 573-584.

9. *R.E.H. Sims, W. Mabee, J.N. Saddler, M. Taylor*, An overview of second generation biofuel technologies, *Bioresource Technology* 101 (2010) 1570-1580.

10. *H.B. Aditiya, T.M.I.Mahlia, W.T.Chong, HadiNur, A.H.Sebayang* Second generation bioethanol production: A critical review *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66(2016) 631-653.

11. Жуков, Н.А. Теоретические основы и технологические принципы непрерывной конверсии растительного сырья. Автореф. дис.... д-ра техн. наук. – Киров, 2001

12. *J.Y. Zhu, X.J. Pan*, Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: technology and energy consumption evaluation, *Bioresource Technology* 101(2010) 4992–5002.

13. Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления сусле из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии / А.Н. Ободович, Т.Д. Грабова, А.Р. Коба, О.А. Горячев // Пром. теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 4. – С. 59 - 63.

14. Лымарь А.Ю. Особенности дискретно – импульсного ввода энергии при диспергировании крахмалосодержащего сырья: дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Лымарь А. Ю. – К., 2014. – 136 с.

15. Драганов Б.Х. Інтенсифікація технології приготування рідких кормів для сільськогосподарських тварин із застосуванням роторно-пульсаційних апаратів (РПА) / Б.Х. Драганов, О.М. Ободович, В.Г. Горобець, О.В. Шеліманова // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. – № 153. – С.1-6.

WORLD'S AND DOMESTIC EXPERIENCE OF BIOETHANOL PRODUCTION

Dolinskyi A.A., Obodovych O. M., Sydorenko V.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.7>

The paper presents an overview of bioethanol production technologies. It is noted that world fuel ethanol production in 2017 amounted to more than 27,000 million gallons (80 million tons). Eight countries, namely the USA, Brazil, the EU, China, Canada, Thailand, Argentina, India, together produce about 98% of bioethanol. In Ukraine, the volume of bioethanol production by alcoholic factories in recent years has been gradually increasing and amounted to 2,992.8 ths. dal in 2017. The production of ethanol as an additive to gasoline, with regard to the raw materials used, as well as the corresponding technologies, is historically divided into three generations. The first generation of biofuels produced from food crops rich in sugar or starch is currently dominant.

Production of advanced biofuels from non-food crop feedstocks is limited. Output is anticipated to remain modest in the short term, as progress is needed to improve technology readiness. The main stages of bioethanol production from lignocellulosic raw materials are pre-treatment, enzymatic hydrolysis and fermentation. The pre-treatment process aims to reduce of sizes of raw material particles, provision of the components exposure (hemicellulose, cellulose, starch), provision of better access for the enzymes (in fermentative hydrolysis) to the surface of raw materials, and reduction of crystallinity degree of the cellulose matrix. The pre-treatment process is a major cost component of the overall process. The pre-treatment process is highly recommended as it gives subsequent or direct yield of the fermentable sugars, prevents premature degradation of the yielded sugars, prevents inhibitors formation prior hydrolysis and fermentation, lowers the processing cost, and lowers the demand of conventional energy in general. From the perspective of efficiency, promising methods of pre-treatment of lignocellulosic raw materials to hydrolysis are combined methods combining mechanical, chemical and physical mechanisms of influence on raw materials. One method that combines several physical effects on a treated substance is the discrete-pulsed energy input (DPIE) method. The DPIE method can be applied in the pre-treatment of lignocellulosic raw material in the technology bioethanol production for intensifying the process and reducing energy consumption. Ref. 15, Fig. 2.

Keywords: bioethanol, lignocellulosic biomass, pre-treatment.

1. *World Fuel Ethanol Production*. Renewable Fuels Association. Retrieved from <http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#E0>

2. *Technology Roadmap – Biofuels for Transport*. International Energy Agency. Retrieved from <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-biofuels-for-transport>

3. *Biofuels for transport*. Tracking Clean Energy Progress. International Energy Agency. Retrieved from <http://www.iea.org/tcep/transport/biofuels>

4. *Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine “On the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2020”*. (01.10.2014). zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>

5. B. Blium Ya. B., Levchuk O.M., Rakhmetov D.B., Rakhmetov S.D. [Biological resources for production of different biofuel types. Scientific conference “Biological resources and the newest biotechnological advancements in biofuel production”], Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2014. № 11. P. 64-72. (in Ukr.)

6. *Advanced R&D and Technologies of the NAS of Ukraine* (2017). The National Academy of Sciences of Ukraine. Retrieved from <http://www.nas.gov.ua/RDOutput/UA/book2017/Pages/Default.aspx>

7. V.I. Sushkova, L.V. Ustyuzhaninova, O.V. Berezina, S.V. Yarotskiy [Methods of preparing plant paw material for bioconversion in feed products and ethanol], Khimiia rastitel'nogo syr'ia [Chemistry of plant raw material], 2016. №1.P.93-119. (in Rus.)

8. Mustafa Vohra, Jagdish Manwar, Rahul Manmode, Satish Padgilwar, Sanjay Patil [Bioethanol production: Feedstock and current technologies], Journal of Environmental Chemical Engineering. 2014. № 2. P. 573-584.

9. R.E.H. Sims, W. Mabee, J.N. Saddler, M. Taylor [An overview of second generation biofuel technologies], Bioresource Technology. 2010. № 101. P.1570–1580.

10. H.B. Aditiya, T.M.I. Mahlia, W.T. Chong, HadiNur, A.H. Sebayang [Second generation bioethanol production: A critical review], Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. № 66. P. 631-653.

11. Zhukov N.A. (2004) [Theoretical bases and technological principles of continuous conversion of plant raw materials], Extended abstract of Doctor's thesis: Kirov (in Rus.).

12. J.Y. Zhu, X.J. Pan [Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: technology and energy consumption evaluation], Bioresource Technology, 2010. № 101. P. 4992-5002.

13. Obodovich A.N., Grabova T.D., A.R. Koba A.R., Goryachev O.A. [Perfection of the technology of preparation

of wort from starch-containing raw material in alcohol production with the use of the method of discrete-impulsive input of energy], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2007. V. 29. №4. P. 77-85. (in Rus.)

14. *Lyimar A.Yu.* (2014) [Features of discrete pulse energy input when dispersing starch-containing raw materials], Candidate's thesis: Kyiv (in Rus.).

15. *Drahanov B.Kh., Obodovych O.M., Horobets V.H., Shelimanova O.V.* [Intensification of the technology

of preparation of liquid feed for farm animals using rotor-pulsating apparatus (RPA)], *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy* [Scientific bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine], 2010. № 153. P.1-6. (in Ukr.)

Отримано 24.09.2018

Received 24.09.2018

УДК 621.43

МЕТОД ПРОФІЛЮВАННЯ ВИХРОВОЇ СПІРАЛЬНОЇ КАМЕРИ

Драганов Б.Х., докт. техн. наук, Демченко В.Г., канд. техн. наук, Погорелова Н.Д.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.8>

Наведені основи конструювання вихрової камери двигуна внутрішнього згорання. Викладений метод дозволяє спроектувати поверхню вихрової камери впускного клапана, яка відповідає сучасним технологічним вимогам.

Приведены основы конструирования вихровой камеры двигателя внутреннего сгорания. Изложенный метод позволяет спроектировать поверхность вихровой камеры впускного канала, отвечающей современным технологическим требованиям.

The basics of designing a vortex chamber of an internal combustion engine are given. The described method allows to design the surface of the vortex chamber of the inlet channel that meets modern technological requirements.

Бібл. 3, рис. 2.

Ключові слова: камера згорання, профілювання, моделювання, графоаналітичний метод.

a – окружність;
 $a_{\Pi 2}$ – фронтальний слід площини Π_2 ;
 b – спіраль;
 h, S – прямі;
 i – вісь проєкцій;
 l – поверхня;
 R – радіус окружності, яка проєціюється;

Z – апліката;
 β – площа;
 Σ – пучок площин;
 φ – кутова відмітка;
 Ω – геометричний визначник (a, b, q) ;
 Π_1, Π_2 – площини проєкцій.

Мета досліджень – розробити метод профілювання спіральної камери, яка забезпечить вихровий рух повітряного заряду на впуск.

Матеріали та методи досліджень. На робочий процес двигуна впливають опір впускного каналу та інтенсивність повітряного вихря. Ефективність вихрового руху потоку в циліндрі двигуна можна збільшити за допомогою спіральної форми клапанної камери. Розглянемо геометричне конструювання спіральної камери двофункціонального гвинтового каналу [1]. Направляючими поверхнями є окружність a , яка лежить в основі камери, і спіраль b (рис.1). За утворюючу поверхню приймається поверхня l , яка проходить через точки перетинання кривих a і b з площиною β , яка інцидентна осі поверхні q . Цей геометричний визначник $\Omega(a, b, q)$ забезпечує спіральну форму камери.

Її проєктують в проєкціях з кутовими відмітками й отримують на кресленні утворюючі поверхні одразу в натуральну величину.

В основі проєкцій з кутовими відмітками лежить метод окружнісного проєціювання. В просторі обирається площина проєкцій Π , в якій розташована вісь проєкцій i . Координатами є: R – радіус окружності, яка проєціюється, Z – апліката, φ – кутова відмітка, кут між площиною проєкції й площиною, яка проходить через дану точку і вісь проєкції i . Вказується напрям проєціювання.

На рис.1 за площину проєкцій прийнято фронтальну площину Π , в якій розташована вісь $i = Z$.

З нею повинна співпадати вісь поверхні q . Поверхня розсікається пучком площин Σ з віссю i . Кожній січній площині з кутовою відміткою φ інцидентні дві утворюючі. У кожній з них кутова відмітка φ , у другої

$-180^\circ + \varphi$. Якщо напрям проєціювання прийняти за годинникову стрілкою, то утворюючі з $\varphi < 180^\circ$ проєціюються у пучок прямих, які лежать зліва від осі i . Проєкції утворюючих з $\varphi > 180^\circ$ будуть розташовані справа від осі i .

При окружнісному проєціюванні фігури, що лежать в площинах пучка Σ , не змінюють своїх форми й розмірів. Отже, утворюючі поверхні відобразяться на площині проєкцій в натуральну величину. Якщо поверхню, що конструюється, розсікти фронтально проєцируючою площиною a (рис.1), то натуральну величину перерізу можна отримати методом суміщення площини a з Π_2 , обертаючи a навколо її фронтального сліду $a_{\Pi 2}$. При цьому точки перерізу $A, B, C, \dots$ будуть обертатися в площинах $b \perp a$, що пересікають по горизонталі h . Площини пучка Σ будуть пересікати a за прямими S , що проходять через точку $S = a \cdot i$. Точки перерізу визначаються в перетині прямих h і S .

Описаним способом горизонталі h проєціюються в прямі, які перпендикулярні до осі $i = Z$, а проєкції прямих S пройдуть через точку S . Цей метод проєціювання зберігає принцип приналежності. Отже, проєкції горизонталей h_2 і прямих S_2^φ пройдуть через відповідні проєкції точок $A_2^\varphi, B_2^\varphi, C_2^\varphi, \dots$. Нижній індекс в позначенні вказує, на яку площину велося проєціювання, верхній – кутову відмітку. Площина в проєкціях з кутовими відмітками задається головною лінією найбільшого ската з лінією, яка проходить через точку $S = a \cdot i$ й перпендикулярної до горизонталей площини a . На рис.1 площина задана фронтальним слідом $a_{\Pi 2}$, тому що з ним у фронтально-проєциуючій площині співпадає головна лінія найбільшого ската C .

Для пошуку натуральної величини перерізу виз-

начається ряд його точок. На рис.2 представлено побудування точки A . Через точку A_2^φ проводиться пряма $h \perp i$ до перетину з $a_{\Pi 2} = C_2^\varphi$ в точці 1.

В сполученому положенні площини a горизонталь пройде через точку 1 перпендикулярно до $a_{\Pi 2}$.

З точки S дугою радіусу SA_2^φ на h робиться засічка, яка й визначить точку A . Таким чином визначаються всі точки перерізу.

Конструювання поверхні доцільно виконати за допомогою відповідного програмного забезпечення. Нижче наводиться алгоритм завдання поверхні в проекціях з кутовими відмітками. Початок координат співпадає з центром направляючої окружності. Система координат на площині ліва.

1. Рівняння окружності a : $R = R_1$, тому що окружність проєціюється в точку з координатою R_p яка дорівнює радіусу окружності R_1 .

2. Рівняння спіралі b : $R_2 = R_1 q^{\varphi/2\pi}$.

3. Різниця координат точок окружності і спіралі, які мають рівні кутові відмітки:

$$\delta = R_2 - R_1 = R_1 (q^{\varphi/2\pi} - 1).$$

4. Кут нахилу проєкції утворюючої до осі

$$R \equiv x: \operatorname{tg} \gamma = h/b,$$

де h – відстань між окружністю a і спіраллю b .

5. Рівняння проєкції утворюючої:

$$I_2^\varphi: z = \operatorname{tg} R - |b|, \quad (1)$$

де $b = -R_1 \operatorname{tg} \gamma$.

Якщо підставити значення $\operatorname{tg} \gamma$ і b , то воно набуде вигляду:

$$Z = \frac{h}{R_1 (q^{\varphi/2\pi} - 1)} (R - R_1), \quad (2)$$

де $\varphi = 0 \dots 2$.

Надаючи φ різні значення й обертаючи утворюючу на відповідний кут, отримуємо поверхню, яка також описується рівнянням (2).

6. Головна лінія найбільшого ската $C_2^\varphi = a_{\Pi 2}$ запишеться рівнянням:

$$Z = \operatorname{tg} \beta R + b_1,$$

де β – кут нахилу C_2^φ до осі $R \equiv x$; $b_1 = H$ – координата точки перетинання головної лінії найбільшого ската з віссю i .

7. Рівняння проєкції прямої

$$S_2^\varphi: Z = \operatorname{tg} \psi R + H, \quad (3)$$

де $\operatorname{tg} \psi = H/S_1$, $S_1 = C_x / \cos \varphi$; $C_x = H / \operatorname{tg} \beta$,

тоді $\operatorname{tg} \psi = \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \beta$.

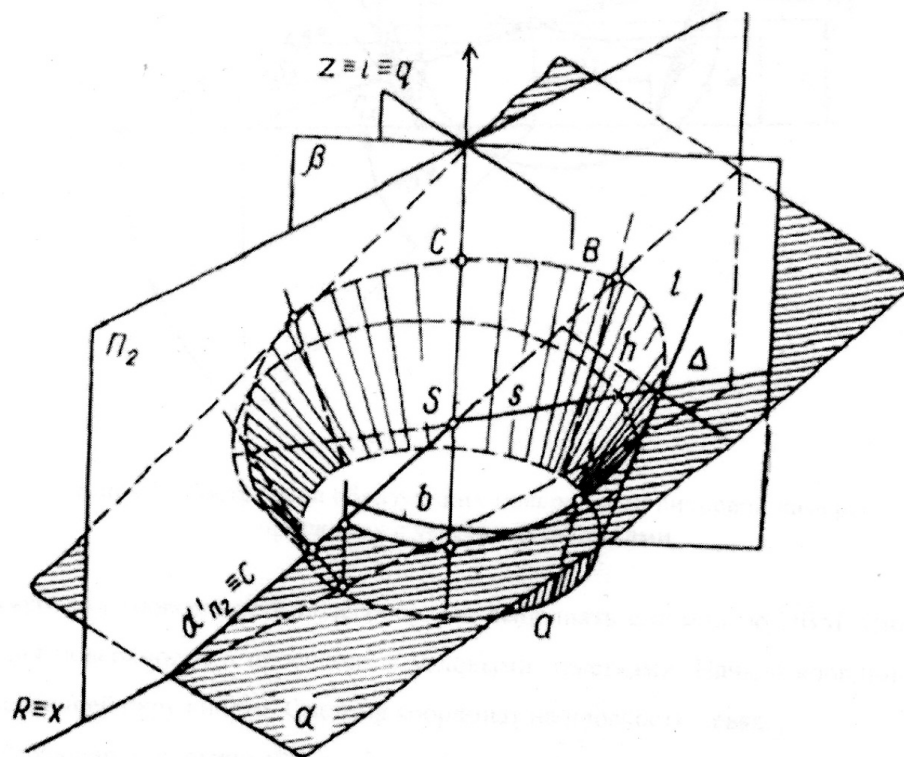


Рис. 1. Побудова точок утворюючої перерізу вихривої спіральної камери.

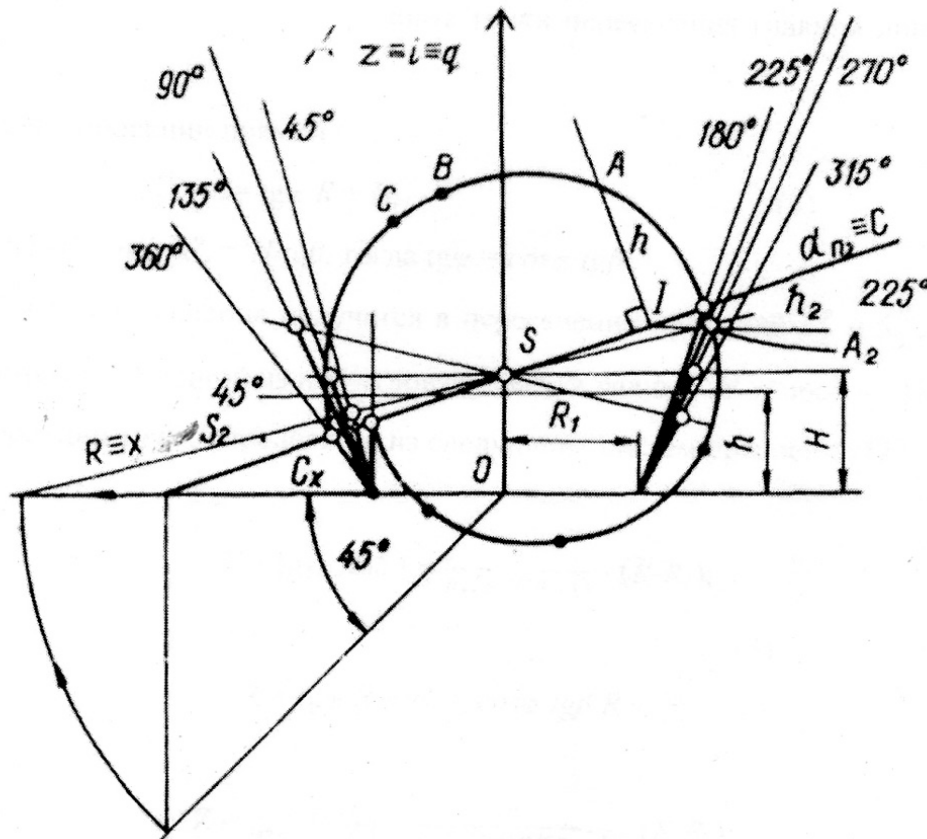


Рис. 2. Побудовання утворюючих поверхні вихрової спіральної камери в проекціях з кутовими відмітками.

8. Проекції точок перерізу утворюються в перетині проєкцій L_2^φ і S_2^φ . Кожна пряма S_2^φ перетинає дві прямі L_2^φ . В одній з них кутова відмітка дорівнює φ . В іншій $-180^\circ + \varphi$.

Координати проєкцій точок визначаються з наступних систем рівнянь [2]:

$$Z = \operatorname{tg} \gamma_1 R - |b_1| = \frac{h}{R_1(q^{\varphi/2\pi} - 1)} - (R - R_1); \quad (4)$$

$$Z = \operatorname{tg} \psi R + H = \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \beta R + H;$$

$$Z = \operatorname{tg} \gamma_2 R - |b_2| = \frac{h}{R_1(q^{180+2\pi} - 1)} (R - R_1); \quad (5)$$

$$Z = \operatorname{tg} \psi R + H = \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \beta R + H;$$

Змінюючи значення параметру a , отримуємо координати Z , R_i окружністних поверхонь різних точок перерізу. Обертання точки на відповідний кут визначить її розташування в просторі. Ортогональні координати визначаємо за формулами:

$$X_{op} = R \cdot \cos \varphi, \quad Y_{op} = R \cdot \sin \varphi, \quad Z_{op} = Z.$$

Викладений метод дозволяє однозначно проєціювати поверхню спіральної камери впускного каналу. Змінюючи значення R^{360} логарифмічної спіралі або h – відстань між окружністю a й спіраллю b – можна встановити оптимальну поверхню спіральної камери, яка забезпечує потрібний вихровий рух повітряного заряду на виході з каналу.

Висновки

1. Ефективність вихрового руху потоку в циліндрі двигуна можна збільшити за допомогою спіральної форми клапанної камери.

2. Використаний метод окружністного проєціювання дозволив встановити оптимальну поверхню спіральної камери, яка забезпечує потрібний вихровий рух повітряного заряду на виході з каналу.

3. Було отримано залежності для конструювання поверхні вихрової спіральної камери в проекціях з кутовими відмітками.

4. Розроблений алгоритм задання поверхні в проекціях з кутовими відмітками дозволяє та його верифікація дають змогу застосування алгоритму для створення автоматизованого виконання розрахунків.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Отеров В.Р.* Методика и некоторые результаты проектирования в цилиндре двигателя // Труды НАМИ. – 1978. – Вып. 171. – с. 34-41.
2. *Драганов Б.Х.* Метод проектирования патрубка, соединяющего коллектор с впускным клапаном / Б.Х. Драганов, А.М. Колесников // Двигатели внутреннего сгорания. – 1979. – Вып. 32. – с. 45-50.

3. *Патент на корисну модель № 27448* Україна. F01L 9/00 Газорозподільний механізм двигуна внутрішнього згоряння / Філіппов А.З., Топчій С.І., Атаманенко М.Є., Герасимчук Ю.А. – № 200708596; Заяв 24.07.2007; Опубл. 25.10.2007, Бюл. № 10.

METHOD OF PROFILING OF VORTEX VALVE CHAMBER

Draganov B.Kh., Demchenko V.G., Pogorelova N.D.

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.8>

The purpose of the research is to develop a method for profiling a spiral chamber that will provide a vortex movement of the air charge at the inlet.

The working process of the engine is influenced by the resistance of the inlet channel and the intensity of the air vortex. The efficiency of the vortex flow in the engine cylinder can be increased by using a spiral-shaped valve chamber. The geometrical design of the spiral chamber of a two-function screw channel is considered. The basics of designing a vortex chamber of an internal combustion engine are given.

The described method allows establishing the optimum surface of the spiral chamber, providing the required vortex movement of the air charge at the exit of the inlet channel.

References 3, figures 2.

Key words: combustion chamber, profiling, modeling, graph-analytical method.

1. *Otherov V.R.* Methodyka I necothoryie rezultaty projectirovaniia v zylindre dvygatelja [Methods and some results of the design in the engine cylinder], Trudy NAMI [Works of the Scientific-Motor Institute] 1978, vyp.171, 34-41p. (Rus.)

2. *Draganov B.Kh.* Method projectirovaniia patrubka, soiediniaushchego collectors vpusknym clapanom [The design method of the pipe connecting the manifold with the inlet valve]// B.Kh. Draganov, A.M.Koliesnikov. Dvygately vnutrennego sgoraniia. 1979. Vyp.32. 45-50p. (Rus.)

3. *Patent na korysnu model #27448* Ukraine. F01L 9/00 [Patent for utility model #27448 Ukraine. F01L 9/00]. Gazorozpodilnyy mehanizm dvyguna vnutrishniogo zghoriannia [Gas-distributing mechanism of internal combustion engine] Filippov A.Z., Topchyi S.I., Atamanenko M.Ye., Gerasymchuk Yu.A. #200708596, zaiav.24.07.2007, opubl. 25.10.2007., biul.#10. (Ukr.)

*Отримано 30.10.2018
Received 30.10.2018*

УДК 620.92

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА І СПОЖИВАННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ З БІОМАСИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ В УКРАЇНІ. ЧАСТИНА 1

Гелету́ха Г.Г., канд. техн. наук, Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Драгнєв С.В., канд. техн. наук,
Баштовий А.І., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.9>

Метою роботи є аналіз існуючих передумов та бар'єрів для широкого запровадження виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси в Україні. Проаналізовано переваги використання брикетів з біомаси як палива. Розглянуто можливі види сировини для виробництва паливних брикетів і вимоги до них.

Целью работы является анализ существующих предпосылок и барьеров для широкого внедрения производства и потребления топливных брикетов из биомассы в Украине. Проанализированы преимущества использования брикетов из биомассы в качестве топлива. Рассмотрены возможные виды сырья для производства топливных брикетов и требования к ним.

Purpose of the work is an analysis of existing preconditions and barriers for the wide introduction of the production and consumption of biomass briquettes in Ukraine. Advantages of the use of biomass briquettes as fuel are analysed. Possible feedstock types for the production of biomass briquettes and requirements to them are considered.

Бібл. 14, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, біоенергетика, біомаса, біопаливо, тверде біопаливо, брикети, пелети.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;
ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПРООН – програма розвитку Організації Об'єднаних Націй;
н.е. – нафтовий еквівалент.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю скорочення споживання дорогих викопних палив в Україні за рахунок використання відновлюваних джерел енергії, у тому числі біомаси. Особливо гостро стоїть питання заміщення природного газу для потреб населення з огляду на суттєвий ріст його ціни за останні роки. Також нагальним є заміщення вугілля, особливо в негасифікованих регіонах країни, де воно є дуже дорогим. Важливу роль в цих процесах може зіграти тверде біопаливо, таке як паливні брикети.

Метою роботи є аналіз існуючих передумов, рушійних сил і перешкод для широкого запровадження виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси в Україні. **Завдання** роботи полягає у визначенні переваг і перспектив цього процесу, в першу чергу, для побутових споживачів, а також у розробці рекомендацій для створення сприятливих умов для розвитку цього сегменту біоенергетики в Україні. **Методи дослідження** включають збір, критичний аналіз і узагальнення статистичних та фактичних даних. **Результати** виконання першої частини завдання представлені у даній статті, інші результати – у другій частині публікації.

Доцільність та переваги використання паливних брикетів з біомаси

Брикети з біомаси – вид твердого біопалива, який широко використовується в країнах, що розвиваються, і інтерес до якого давно існує і постійно зростає в розвинутих країнах Європи і Північної Америки. Так, у Швеції перші брикетувальні лінії з'явилися на

кількох великих лісопильних заводах ще на початку 1900-х років. Великомасштабне виробництво брикетів з деревини розпочалося у 1970-х роках після першої нафтової кризи і сьогодні становить більше 300 тис. т/рік. Цікавим прикладом є система централізованого теплопостачання у містечку Флорю, яка повністю працює на деревних брикетах, щорічно постачаючи споживачам близько 9 ГВт·год теплової енергії [1, 2].

В Німеччині обсяг виробництва брикетів з деревини і біомаси сільськогосподарського походження (агробіомаси) складає більше 1,75 млн. т/рік при загальній встановленій потужності брикетувального обладнання 3,25 млн. т/рік. Основна частина вироблених паливних брикетів (близько 1,2 млн. т/рік) споживається на внутрішньому ринку, а решта експортується в інші країни Європи. В Німеччині брикети з біомаси застосовуються, головним чином, в побутових і малих котлах з ручним завантаженням, але певний обсяг також використовується в напіваавтоматизованих і повністю автоматизованих котлах потужністю до 5 МВт. Велика увага приділяється розробці та вдосконаленню спеціалізованого енергетичного обладнання, в результаті чого досягнуто низької емісії шкідливих речовин при спалюванні брикетів і високого ККД роботи обладнання (до 90%).

Приклади інших європейських країн: річний обсяг виробництва брикетів з біомаси становить в Хорватії більше 60 тис. т, в Сербії – 30 тис. т, в Боснії і Герцеговині – 35 тис. т, в Македонії – 5 тис. т, в Чехії – 188 тис. т разом пелет та брикетів. Виробництво брикетів з біо-

маси сільськогосподарського походження (агробіомаси) активно розвивається в Молдові, наразі воно оцінюється у більше 86 тис. т/рік, причому нові виробники могли отримати певну підтримку в рамках проекту ЄС-ПРООН «Енергія і біомаса» [3].

Тема паливних брикетів з біомаси є надзвичайно актуальною і для України. З травня 2015 року в країні почалося суттєве підвищення цін на природний газ для домогосподарств, в результаті чого населення стало активно переходити на біомасу. Було встановлено велику кількість побутових твердопаливних котлів, в яких на сьогодні спалюються, в основному, дрова. Значний обсяг дров заготовлюється населенням самостійно (так звана «самозаготівля») із полязахисних та інших лісосмуг, що фактично призводить до їх знищення. Такі дрова мають велику вологість, низьку якість і не відповідають паспортним вимогам енергетичного обладнання. Наслідком їх застосування в побутових твердопаливних котлах є низька ефективність роботи обладнання і високий рівень емісії шкідливих речовин.

Виходом з цієї негативної ситуації може бути перехід з низькоякісних дров на брикети з біомаси. Головним чином, мова іде про виробництво і використання брикетів з побічних продуктів і відходів сільськогосподарства (соломи зернових та ріпаку, стебел кукурудзи і соняшника, інших видів біомаси) з огляду на великий потенціал агробіомаси в Україні, доступний для енергетичного використання – близько 8,3 млн. т н.е./рік (дані 2016 р.) [4].

Брикети – це покращене біопаливо з прогнозованою якістю, тому їх часто називають «євродровами». Серед

основних переваг використання паливних брикетів з біомаси можна виділити наступні:

- Відповідність вимогам котельного обладнання, кращі екологічні показники при спалюванні.
- Можливість застосування в існуючих пічках, побутових (15...30 кВт) та невеликих твердопаливних котлах з ручним завантаженням (до 100...150 кВт). Брикети не потребують спеціалізованого обладнання на відміну від більш дорогих пелет з біомаси.
- Потенційна можливість використання брикетів з відносно низькою щільністю («м'яких») в більш потужних котлах зі шнековою подачею (до 1 МВт).
- Наявність значної сировинної бази, особливо для брикетів з біомаси сільськогосподарського походження.
- Відносно низька ціна. У брикетів ціна за одиницю енергії є порівняною з дровами при набагато кращих паливних характеристиках (табл. 1).
- Брикети є більш зручними та економічними, ніж дрова, при транспортуванні та зберіганні. За рахунок більшої енергетичної щільності потребують менших витрат праці при ручному завантаженні в котел.
- Брикети можуть виступати в ролі більш дешевого заміниника вугілля, особливо в тих регіонах, де вугілля є дорогим (4000 грн./т і більше). Вартість одиниці енергії в брикетах з соломи/лушпиння соняшника може бути до 2 разів меншою, ніж у вугіллі (табл. 1).

Огляд ринку твердих біопалив в Україні

Згідно даних Енергетичного балансу України за 2016 рік [5], виробництво біопалив та відходів в країні склало 3348 тис. т н.е., а постачання первинної енергії

Табл. 1. Порівняння питомої вартості енергії викопних палив і біомаси [3].

Вид палива або енергоносія	Ціна (на квітень 2018 р.), грн./т без ПДВ	Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	Вартість одиниці енергії в паливі / енергоносії, грн./ГДж без ПДВ
	А		А/Б
Природний газ для населення	5798 грн./тис. м ³	34,0	171
Природний газ для промисловості	8686 грн./тис. м ³	34,0	256
Вугілля	3000...5000	25,0	120-200
Мазут	9000	42,0	214
Електроенергія	1,91 грн./кВт·год	-	531
Пелети/брикети з деревини	2900*	17,0	171
Пелети з лушпиння	1700*	17,5	97
Пелети з соломи	1800*	16,0	112
Брикети з лушпиння	1600*	17,5	91
Брикети з соломи	1900*	16,0	119
Дрова (вологість 40%)	950	10,0	95
Деревна тріска	1000	10,1	99
Тюки соломи чи стебел кукурудзи	900	14,6	62

* Орієнтовна ціна. Реальна ціна суттєво залежить від показників якості конкретної партії пелет/брикетів та від регіону виробництва.

з них – 2832 тис. т н.е. (3,1% ЗППЕ). Різниця формувалась, головним чином, за рахунок експорту біопалив (553 тис. т н.е. у 2016 р.). Ріст сектору біоенергетики України протягом 2010-2016 рр. оцінюється, в середньому, у 45% на рік по показнику виробництва біопалив та відходів і 35% на рік по загальному постачанню первинної енергії з них.

На ринку біопалив найбільший сегмент займає тверде біопаливо у вигляді дров, деревної тріски, пелет та брикетів з біомаси, тюкованої соломи. За оцінками фахівців, загальне виробництво пелет в Україні у 2015 р. склало близько 1,32 млн. т на 494 підприємствах, у тому числі пелет з деревини – до 390 тис. т, з лушпиння – близько 724 тис. т, з соломи – 146 тис. т, з торфу – 8,4 тис. т, з інших видів сировини – 51,8 тис. т [6].

Паливні брикети в Україні виробляються у менших обсягах ніж пелети, при цьому в якості сировини в основному використовують деревину, лушпиння, солому та очерет. Виробництво брикетів з деревини у 2015 р. становило 170 тис. т, з агрокультур – 95 тис. т [7].

Наразі велика частка пелет та брикетів експортується з України в Європу через недостатньо великий попит на внутрішньому ринку. Так, експорт деревних пелет у 2015 р. склав більше 150 тис. т (38,5% загального обсягу виробництва), експорт пелет з лушпиння (враховуючи реекспорт) – майже 822 тис. т. Незважаючи на ряд існуючих проблем, даний сегмент біоенергетики продовжує розвиватися. Створення сприятливих умов на внутрішньому ринку сприятиме переорієнтації експорту твердого біопалива на продаж в Україні.

Основними особливостями виробництва твердого біопалива в Україні є регіональна нерівномірність та відносна розпорошеність виробництва, а також велика кількість невеликих за масштабом підприємств, що працюють з трейдерами. Також характерним є розміщення виробництва якомога ближче до сировинної бази. Наприклад, виробники деревних та торф'яних пелет, переважно, представлені на заході України та у невеликій кількості – в індустріальних районах центру та сходу. Так, до 70% загального обсягу виробництва деревних пелет забезпечують сім областей – Закарпатська, Волинська, Чернігівська, Київська, Житомирська, Львівська, Сумська.

Виробники пелет з лушпиння тяжіють до центральних та східних регіонів, де наявна сировинна база вторинних відходів переробки соняшника завдяки великій концентрації олійноекстракційних заводів. Наприклад, тільки чотири області – Дніпропетровська, Запорізька, Одеська, Миколаївська – забезпечують виробництво до 413 тис. т/рік, тобто більше половини всіх пелет з лушпиння в Україні. Виробники пелет з соломи розташовані в аграрних районах і характеризуються невеликою кількістю та більшою концентрацією виробництва [6].

Ціни на тверді біопалива суттєво відрізняються у різних виробників і по регіонах країни. Також спостерігається коливання цін протягом року. Зокрема, вони зростають у опалювальний період за рахунок зміни балансу попиту і пропозиції. На кінцеву ціну суттєво

впливають умови поставки та відстань транспортування. Крім цього, біопаливо при наявності сертифікату, який підтверджує якість продукції, коштує дорожче і, переважно, експортується. Наприклад, сертифіковані за ENplus A1 [8] деревні пелети коштують на 100 євро/т дорожче, а агропелети – на 20 євро/т дорожче порівняно із несертифікованими.

Пелети та брикети вважаються покращеним твердим біопаливом з огляду на їх більш високу теплотворну здатність, меншу вологість та вищу енергетичну щільність (ГДж/м³) у порівнянні з неущільненими видами біомаси та біопалива (солома-січка, лушпиння, тирса, тріска, дрова).

Поточний обсяг ринку України для паливних брикетів з біомаси для потреб населення (індивідуальне опалення) можна оцінити у близько 500 тис. т/рік із ростом до більше 3 млн. т/рік до 2035 року (рис. 1). Оцінка ґрунтується на ключових показниках Енергетичної стратегії України на період до 2035 року [9] та прогнозах авторів щодо структури споживання твердих біопалив і виробництва теплової енергії з ВДЕ по різних секторах до 2050 року [10, 11].

Треба зазначити, що в Україні діє субсидія для населення на придбання твердого пічного побутового палива, у тому числі брикетів з біомаси. Субсидія призначається у разі, коли житлове приміщення не забезпечується електро-, тепло- або газопостачанням для опалення. Субсидія визначається виходячи з норми палива у 2 т на одне домогосподарство на рік і граничного показника вартості палива (у 2018 р. – 2424,16 грн./т) на основі річного сукупного доходу сім'ї за попередній календарний рік [12, 13].

Види сировини для виробництва паливних брикетів та вимоги до неї

Брикетування – це процес ущільнення матеріалу під високим тиском, а в ряді випадків і при нагріванні до 250-350 °С. При цьому в рослинній сировині відбувається виділення лігніну, який є сполучною речовиною для формування брикету. Для брикетів не з деревної біомаси можуть застосовуватися екологічно чисті добавки (не більше 2%).

Сировиною для виробництва паливних брикетів може бути деревина м'яких і твердих порід, солома, очерет, лушпиння соняшника, лушпайка рису та гречки, лляна костриця, інші рослинні відходи. Типовими вимогами до сировини є вологість 6...12%, фракційний склад 2...10 мм (табл. 2).

Об'єм брикету складає близько 1/10 об'єму витраченої на його виробництво сировини. Брикетування біомаси дозволяє суттєво збільшити насипну щільність та питому енергетичність біопалива, що спрощує його логістику (транспортування, зберігання) і зменшує витрати на неї. Крім того, кінцевий продукт (брикети) має більш однорідні якісні характеристики у порівнянні з неущільненою біомасою.

Якість брикетів в значній мірі залежить від вологості вихідної сировини. Розрізняють оптимальну і критичну вологість. Оптимальна вологість складає 4...10%, при ній досягаються найкращі механічні ха-

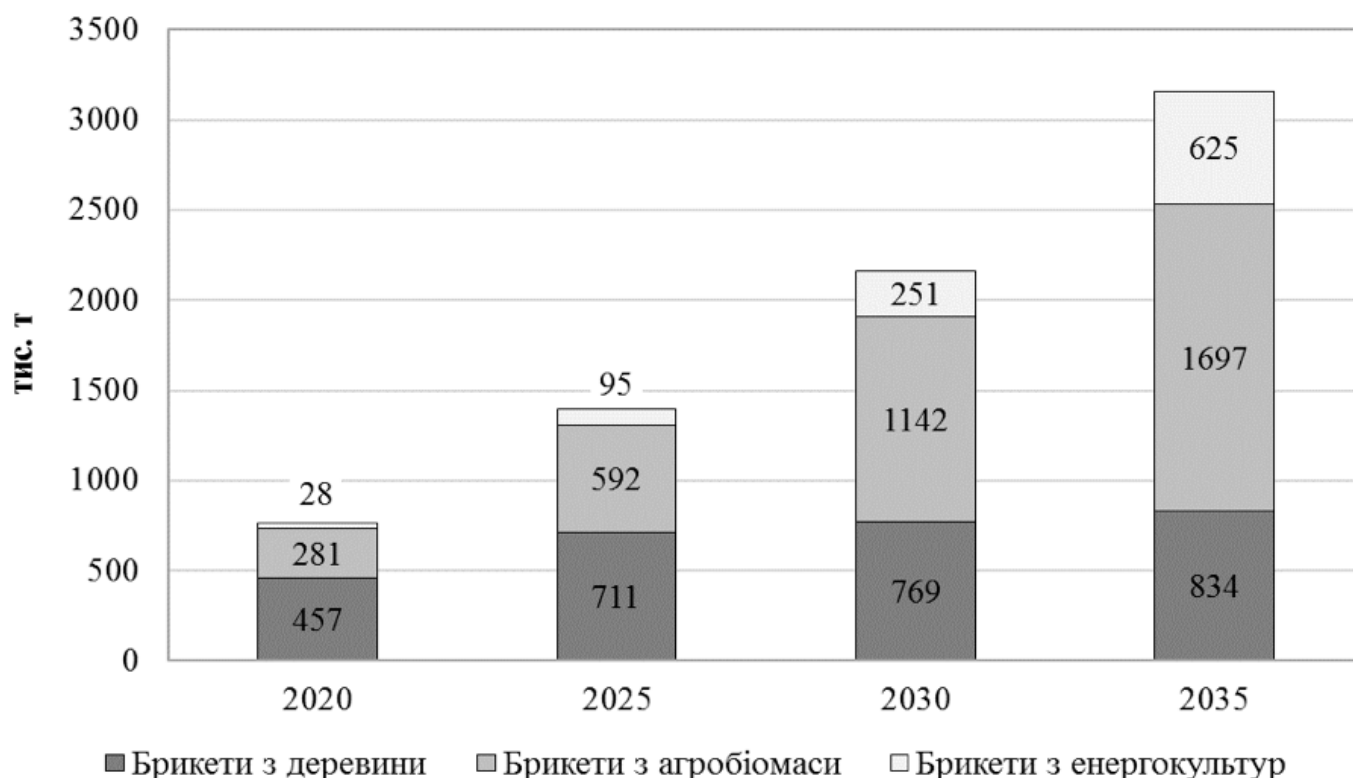


Рис. 1. Прогнозна оцінка обсягу ринку України для паливних брикетів з біомаси для потреб населення (індивідуальне опалення) [3].

Табл. 2. Характеристики сировини для виробництва брикетів [3].

Сировина	Характеристики вихідної сировини			Щільність брикету, т/м³
	Насипна щільність, кг/м³	Вологість, %	Фракція, мм	
Лушпиння соняшнику	100	4...9	6...10	1,15
Лушпиння соняшнику (подрібнене)	260	6...9	2...5	1,09
Гречана лушпайка	160	5...12	2...5	1,03
Рисова лушпайка	125	5...12	2...6	1,01
Тирса дубова	270	6...12	2...5	1,25
Тирса соснова	125	6...8	2...5	1,15
Солома (січка)	40-60	8...14	5...30	0,7...0,9

Характеристики брикетів. Однак, треба враховувати, що для деяких видів сировини верхньою межею вологості є 6...8%. Критичною називається вологість, при якій можливе формування брикетів, але в ньому з'являються тріщини, і брикет втрачає товарний вигляд. Критична вологість знаходиться в межах 10...15%. При більш високій вологості отриманий брикет буде «розірваний» внутрішнім тиском вологи, що виникає при стисненні подрібненої маси.

Як вже зазначалося, для умов України особливий інтерес представляє виробництво та використання брикетів з біомаси аграрного походження. Солома зернових культур зазвичай має порівняно низький вміст вологи (в межах 20%) і може бути гранульована/брикетована або тюкована і спалена без додаткової сушки. Слід зазначити, що оптимальним показником відносної вологості для соломи як палива є 11...15%. Солому вологістю вище 22% не бажано використовувати,

оскільки це погіршує якість спалювання.

З економічної точки зору виробництво брикетів з біомаси є більш привабливим, ніж виробництво пелет, оскільки інвестиції у лінію брикетування та експлуатаційні витрати є значно нижчими у порівнянні з лінією гранулювання аналогічної продуктивності. Середні витрати електроенергії на виготовлення 1 т брикетів з біомаси складають 60...80 кВт·год, а на 1 т пелет – 90...110 кВт·год [14]. При брикетуванні до сировини ставляться не такі високі вимоги, як при гранулюванні, тому можливе отримання брикетів із значно більших видів біомаси.

Висновки

Брикети з біомаси являють собою покращене тверде біопаливо і можуть використовуватися для заміщення дорогих викопних палив. Особливо важливу роль паливні брикети можуть грати для побутового сектора з огляду на високу ціну природного газу для населення і ймовірність її подальшого підвищення. Крім того, брикети з біомаси можуть виступити як заміник вугілля, особливо в негазифікованих регіонах України, де вугілля є дуже дорогим. Вартість одиниці енергії в брикетах з соломи або лушпиння соняшника може бути до 2 разів меншою, ніж у вугіллі. Основними перевагами використання брикетів є їх відповідність вимогам котельного обладнання і кращі екологічні показники при спалюванні (у порівнянні з низькоякісними дровами), відсутність потреби у спеціалізованому енергетичному обладнанні (на відміну від пелет), наявність значної сировинної бази, особливо для брикетів з біомаси сільськогосподарського походження. Поточний обсяг ринку України для паливних брикетів з біомаси для потреб населення (індивідуальне опалення) можна оцінити у близько 500 тис. т/рік із ростом до більше 3 млн. т/рік до 2035 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Susanne Paulrud*. Upgrade Biofuels – Effects of quality on processing, handling characteristics, combustion and ash melting. Doctor Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, 2004
<https://pub.epsilon.slu.se/533/1/Agraria449.pdf>
2. *Johan Karlhager*. The Swedish market for wood briquettes: production and market development, 2008
https://stud.epsilon.slu.se/12071/1/karlhager_j_171108.pdf
3. Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В. Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України № 20, 2018
<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-20-ua.pdf>
4. Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. – 2018. – Т. 40, № 1. – С. 68-74.
<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
5. *Енергетичний баланс України за 2016 рік*. Експрес-випуск Державної служби статистики України № 506/0/08.4вн-17 від 20.12.2017.
6. Гелетуша Г.Г., Крамар В.Г., Енік О.В. та ін. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси. Підготовлено в рамках проекту ПРООН/ГЕФ «Розвиток та комерціалізація біоенергетичних технологій у муніципальному секторі в Україні», 2016
http://uabio.org/img/files/docs/kompleksnii_analiz_ukrayinskogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf
7. Коломийченко М.В. Дорожня карта з розвитку ринку твердого біопалива України. Підготовлено в рамках проекту ПРООН/ГЕФ «Розвиток та комерціалізація біоенергетичних технологій у муніципальному секторі в Україні», 2016
http://bioenergy.in.ua/media/filer_public/b4/bd/b4bda440-5ab8-4c64-943a-a094da7a757f/dorozhnia_karta_z_rozvitku_rinku_tverdogo_biopaliva_ukrayini.pdf
8. *Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes*, version 2.0. European Pellet Council, 2013
<http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2012/01/ENplus-Handbook-2.0.pdf>
9. *Енергетична стратегія України на період до 2035 року* «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвалено Розпорядженням КМУ від 18.08.2017 № 605-р
<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>
10. Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. – 2018. – Т. 40, № 1. – С. 61-67.
<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>
11. Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А., Баштовий А.І., Гелетуша Г.І. Проблеми та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. – 2018. – Т. 40, № 2. – С. 41-48.
<https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>
12. *Постанова КМУ № 848* від 21.10.1995 (із змінами)
<http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/ru/848-95-%D0%BF/page>
13. *Постанова КМУ № 356* від 23.04.2012 (із змінами)
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/356-2012-%D0%BF>
14. Д.П. Кіндзера, В.М. Атаманюк, Р.Р. Гоговський, І.М. Мотіль. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України, 2013, вип. 23.17, с. 138-146.
http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2013/23_17/138_Kin.pdf

ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR THE PRODUCTION AND CONSUMPTION OF AGROBIOMASS BRIQUETTES IN UKRAINE.

PART 1

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V.,
Bashtovyi A.I.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.9>

The purpose of the work is to analyze existing preconditions, driving forces, and barriers for the widespread introduction of the production and use of fuel briquettes from biomass in Ukraine. The task of the work is to determine the advantages and prospects of the process, first of all, for domestic consumers, as well as to develop recommendations for creating a positive environment for the development of this segment of bioenergy in Ukraine. This part of the paper presents the current state of the market for solid biofuels in Ukraine. It is shown that in the biofuel market, the largest segment is solid biofuel in the form of firewood, wood chips, pellets and biomass briquettes, baled straw. Currently, a large amount of pellets and briquettes are exported from Ukraine to Europe due to the insufficient demand in the domestic market. The main features of the solid biofuels production in Ukraine are regional unevenness and relative non-uniformity of production as well as a large number of small-scale enterprises that work with traders. The advantages of the use of biomass briquettes as fuel were analyzed. The main advantages are the conformity of characteristics of briquettes with the requirements of boiler equipment for fuel, better ecological indicators in comparison with the burning of low-quality wood, no needs for specialized energy equipment in contrast with the use of pellets, availability of a significant amount of feedstock especially for briquettes from the biomass of agricultural origin. The current volume of the Ukrainian market for fuel briquettes from biomass for individual heating of the population can be estimated at the level of 500 th. t/year with its growth to over 3 million t/year until 2035. This part of the paper considers possible types of feedstock for the production of fuel briquettes and requirements for it. It is noted that the feedstock for the production of fuel briquettes can be soft and hard wood, straw, reed, sunflower husk, rice and buckwheat husk, flax sheave, and other vegetable residues. Typical requirements for the feedstock: water content – 6...12%, fraction composition – 2...10 mm. References 14, tables 2, figure 1.

Key words: renewable energy sources, bioenergy, biomass, biofuel, solid biofuel, briquettes, pellets

1. Susanne Paulrud. *Upgrade Biofuels* – Effects of quality on processing, handling characteristics, combustion and ash melting. Doctor Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, 2004

<https://pub.epsilon.slu.se/533/1/Agraria449.pdf>

2. Johan Karlhager. The Swedish market for wood briquettes: production and market development, 2008

https://stud.epsilon.slu.se/12071/1/karlhager_j_171108.pdf

3. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Analiz mozhlyvosti vyrobnytstva ta vykorystannia bryketiv z ahrobiomasy v Ukraini. Analichna zapyska Bioenerhetychnoi asotsiatsii Ukrainy № 20, 2018 [Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V. Analysis of the possibilities of production and use of briquettes from agro biomass in Ukraine. UABio Position Paper N 20, 2018] (in Ukr.).

<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-20-ua.pdf>

4. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I. Perspektyvy vykorystannia biomasy vid obrizky ta vydalennia bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzen dla vyrobnytstva enerhii v Ukraini [Prospects for using biomass from agrarian pruning and plantation removal in Ukraine], *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. – 2018, V. 40, № 1, P. 68-74. (in Ukr.)

<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>

5. Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2016 rik. Ekspres-vypusk Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy № 506/0/08.4vn-17 vid 20.12.2017 [Energy balance of Ukraine for 2016. Express-issue by State Statistics Service of Ukraine № 506/0/08.4vn-17 of 20.12.2017] (in Ukr.)

6. Geletukha G.G., Kramar V.G., Epik O.V. et al. Kompleksnyi analiz ukraïnskoho rynku pelet z biomasy. Pidhotovleno v ramkakh proektu PROON/HEF “Rozvytok ta komertsializatsiia bioenerhetychnykh tekhnolohii u munitsypalnomu sektori v Ukraini” [Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market. Prepared within the UNDP/GEF project “Development and commercialization of bioenergy technologies in the municipal sector of Ukraine”], 2016 (in Ukr.).

http://uabio.org/img/files/docs/kompleksnii_analiz_ukrayinskogo_rinku_pelet_z_biomasi.pdf

7. Kolomyichenko M.V. Dorozhnia karta z rozvytku rynku tverdoho biopalyva Ukrainy. Pidhotovleno v ramkakh proektu PROON/HEF “Rozvytok ta komertsializatsiia bioenerhetychnykh tekhnolohii u munitsypalnomu sektori v Ukraini” [Road map on the development of the market for solid biofuels in Ukraine. Prepared within the UNDP/GEF project “Development and Commercialization of Bioenergy Technologies in the Municipal Sector in Ukraine”], 2016. (in Ukr.).

http://bioenergy.in.ua/media/filer_public/b4/bd/b4bda440-5ab8-4c64-943a-a094da7a757f/dorozhnia_karta_z_rozvytku_rinku_tverdogo_biopalyva_ukrayini.pdf

8. *Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes*, version 2.0. European Pellet Council, 2013

<http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2012/01/ENplus-Handbook-2.0.pdf>

9. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku “Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist”. Skhvaleno Rozporiadzhenniam KMU vid 18.08.2017 № 605-r [Energy Strategy of Ukraine

until 2035 “Safety, energy efficiency, competitiveness”. Approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine Executive Order No. 605-r of 18.08.2017] (in Ukr.).

<http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>

10. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I. Analiz mozhyvostei zahotivli derevnoho palyva v lisakh Ukrainy [Analysis of opportunities for harvesting wood fuel in the forests of Ukraine], *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. – 2018, V. 40, № 1, P. 61-67. (in Ukr.).

<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

11. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I., Geletukha G.I. Problemy ta perspektyvy rozvytku bioenerhetyky v Ukraini [Problems and prospects for bioenergy development in Ukraine], *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering]. – 2018, V. 40, № 2. – P. 41-48. (in Ukr.).

<https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.06>

12. *Postanova KMU № 848* vid 21.10.1995 (iz zminamy) [Resolution of the CMU N 848 of 21.10.1995 (as amended)] (in Ukr.)

<http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/ru/848-95-%D0%BF/page>

13. *Postanova KMU № 356* vid 23.04.2012 (iz zminamy) [Resolution of the CMU N 356 of 23.04.2012 (as amended)] (in Ukr.)

<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/356-2012-%D0%BF>

14. Kindzera D.P., Atamanyuk V.M., Gosovsky R.R., Motyl I.M. Doslidzhennia protsesu formuvannia palyvnykh bryketiv iz roslynnoi syrovyny ta vyznachennia yikh kharakterystyk [The study of the formation of fuel briquettes from plant materials and determination of their characteristics], *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy* [Science Herald of National Forest-Technology University], 2013, V. 23.17. P. 138-146. (in Ukr.)

http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2013/23_17/138_Kin.pdf

Отримано 22.08.2018

Received 22.08.2018

УДК 621.396.6.019:536.5.001.24

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА ЧАЭС

Круковский П.Г., докт. техн. наук, Метель М.А., Дейнеко А.И., Скляренко Д.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев-57, 03057, Украина<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.10>

Представлені результати аналізу та прогнозування поширення радіоактивних аерозолів (РА) в новому безпечному конфайнменті (НБК) в різних умовах. Розглядаються умови для введення в експлуатацію НБК, експлуатації, демонтажу об'єкта «Укриття» (ОУ) (раннього демонтажу) та видалення радіоактивних відходів з центрального залу ОУ. Такий аналіз та прогнозування проводили за допомогою комп'ютерної CFD (обчислювальна гідродинаміка) моделі ОУ та НБК. Модель враховує осідання, накопичення та вторинні викиди пилу на поверхнях під НБК, що дозволяє отримувати розподіл поверхневого забруднення та визначати місця найбільшого забруднення.

Представлены результаты анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) в новом безопасном конфайнменте (НБК) в различных условиях. Рассмотрены условия для ввода в эксплуатацию НСК, эксплуатации, демонтажа объекта «Укрытия» (ОУ) (ранний демонтаж) и удаления радиоактивных отходов из центрального зала ОУ. Такой анализ и прогнозирование проводились с использованием компьютерной CFD (вычислительная гидродинамика) модели ОУ и НБК. Модель учитывает осаждение, накопление и вторичные выбросы пыли на поверхности под НБК, что позволяет получать распределения поверхностного загрязнения и определять места наибольшего загрязнения.

The results of analysis and forecasting of the radioactive aerosols (RA) spread in the New Safe Confinement (NSC) under various conditions are presented. The conditions for the commissioning NSC, operation, dismantling of the OS (early dismantling) and removal of radioactive waste from the central hall of the OS are considered. Such analysis and forecasting was performed using computer CFD (computational fluid dynamics) model of the OS and NSC. The model takes into account sedimentation, accumulation and secondary dust emissions on the surfaces under the NSC, which allows obtaining distributions of surface contamination and determine the places of the highest contamination.

Библ. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, новый безопасный конфайнмент, разборка объекта «Укрытия», CFD моделирование, концентрация радиоактивного аэрозоля.

Q – поток массы;
 K – коэффициент;
 C – объёмная доля;
 V – объём;
 r – радиус;
 W – скорость воздуха;
 K – коэффициент ресуспензии;
 ρ – плотность;
 π – математическая постоянная;
 η – Кинематическая вязкость;
 σ – поверхностное загрязнение.

Индексы нижние:

общ – общий поток;
 под – подъёмный поток;
 ос – оседающий поток;
 ч – частичка;
 dir – учет ориентации поверхности;
 vof – учет второй фазы;
 res – учет ресуспензии.

Индексы верхние:

n – показатель степени.

Новый Безопасный Конфайнмент (НБК) был установлен в проектное положение над объектом «Укрытие» (ОУ) Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) и в настоящее время продолжают работы по его вводу в эксплуатацию. Объект «Укрытие» представляет собой структуру, спешно построенную в период с середины июня до 29 ноября 1986 года. Сейчас это частично разрушенная конструкция, все еще содержащая большое количество ядерного топлива и других твердых и жидких радиоактивных отходов. В ОУ существует ряд потенциально опасных факторов, которые необходимо постоянно контролировать, изучать и принимать соответствующие меры для снижения потенциальной опасности каждого из них. Основными из этих факторов являются: опасность обрушения конструкций ОУ, ядер-

ная безопасность, высокие радиационные поля, радиоактивные аэрозоли и скопления воды.

Моделирование радиоактивных аэрозолей внутри ОУ ЧАЭС рассматривается в работе [1], но в работе не учитывается оседание частиц на поверхности под действием силы тяжести.

В данной работе рассмотрены вопросы анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) под НБК при помощи разработанной компьютерной модели. Анализируются концентрации радиоактивных аэрозолей после включения системы вентиляции и при проведении различных работ либо событий, которые могут сопровождаться повышенными выбросами РА.

CFD-модель ОУ и НБК. Одним из способов ана-

лиза и прогнозирования поведения процессов внутри ОУ является компьютерное CFD-моделирование (англ. Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика), которое позволяет прогнозировать распределение температур, влажности, скоростей воздуха и других величин, таких как концентрации примесей или фаз [2].

Для НБК и ОУ была разработана и верифицирована компьютерная 3-х мерная CFD (computational fluid dynamics) модель [3], отражающая их основную геометрическую структуру, физические свойства и процессы, такие как теплоперенос, вынужденное и естественное тепловое движение воздуха, выделение и распространение РА, наличие водных скоплений, испарение и распространение влаги в воздухе (Рис. 1).

Трехмерная модель ОУ и НБК (рис. 2) включает в себя объем кольцевого пространства (КП) с патрубками системы вентиляции, технологическое здание НБК, Объект «Укрытие» и прилегающие к нему строения: деаэрационная этажерка, машинный зал, блоки Б, вспомогательные системы реакторного отделения (ВСРО) и часть здания 3-го энергоблока ЧАЭС. Объем деаэрационной этажерки (ДЭ) предусматривает наличие принудительной вентиляции, объем ОУ – естественную вентиляцию через проемы в крыше.

Кольцевое пространство НБК с внутренней и внешней сторон ограничено оболочками, служащими для

изоляции трубного каркаса НБК от окружающей среды. Также в объединенной модели ОУ и НБК представлено технологическое здание, фундаменты опор НБК, вентиляционные системы ОО и кольцевого пространства (КП) НБК.

Недостаточно точно известные параметры модели (воздухообмен и источники РА в ОУ, и др.) уточнялись путем решения задач идентификации параметров по данным измерений концентрации и скорости оседания РА в подарочном пространстве НБК. Данные измерений накопительных планшетов, аспирационных установок и др. приборов, получены от Института проблем безопасности АЭС.

Подход к моделированию радиоактивных аэрозолей. Радиоактивные аэрозоли в модели представлены как одна из фаз многофазной среды, при этом учитываются процессы их переноса с потоками воздуха, за счет диффузии, в том числе турбулентной, выбросы РА из центрального зала ОУ и их постепенное оседание под действием силы тяжести. Одним из важных дополнений модели стал учет в ней оседания, накопления и вторичного пылеподъема (ресуспензии) на поверхностях под НБК, что дает возможность получать распределения поверхностного загрязнения и определять места наибольшего загрязнения.

Математическая модель вторичного пылеподъема основывается на следующих принципах. Результирую-

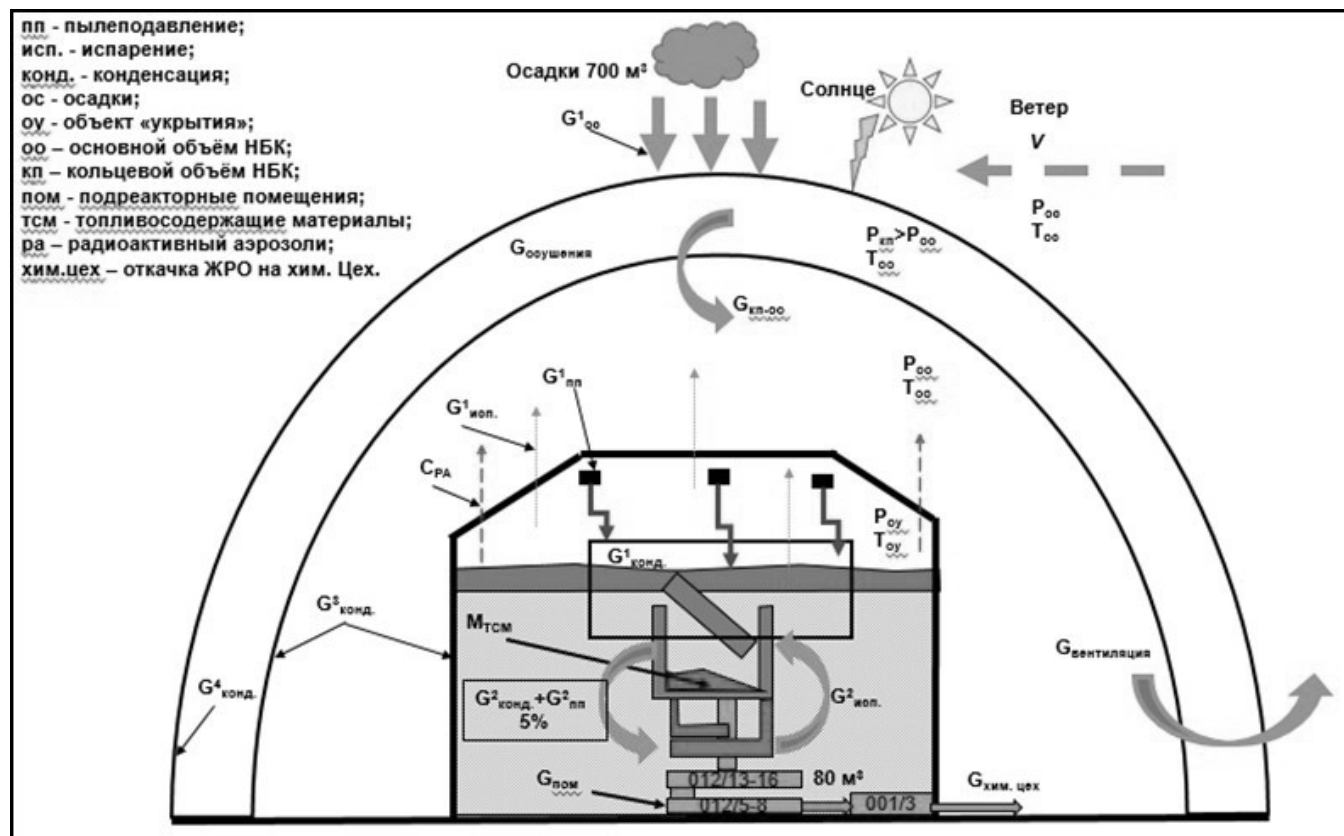


Рис. 1. Схема физических процессов, протекающих в ОУ и НБК.

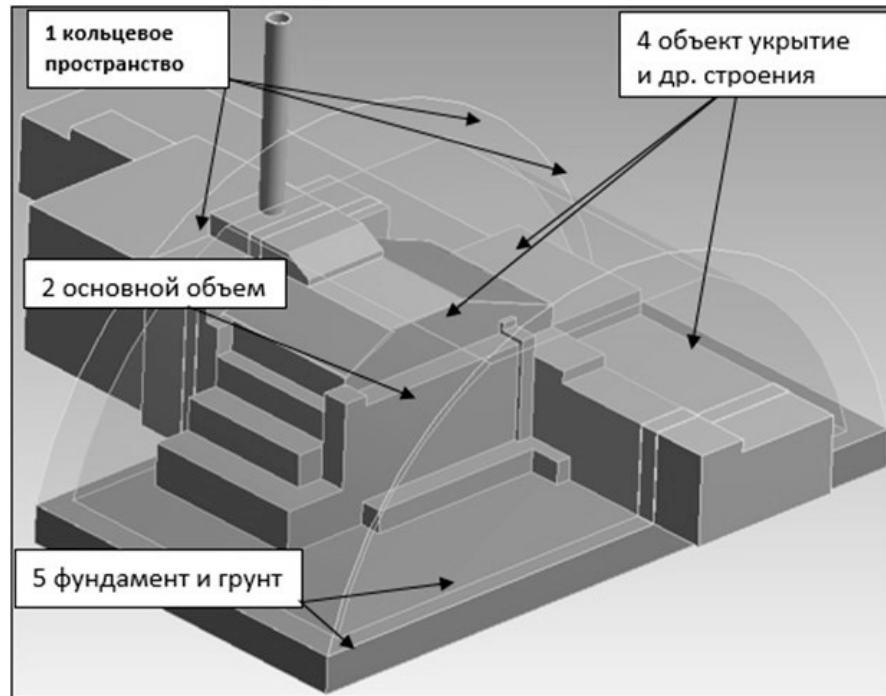


Рис. 2. Основные части объединенной модели НБК и ОУ.

щий поверхностный поток РА $Q_{\text{общ}}$ равен сумме потока оседания $Q_{\text{ос}}$ и потока выброса $Q_{\text{под}}$:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{под}} - Q_{\text{ос}}, \quad (1)$$

Поверхностный поток оседания определяется законом Стокса:

$$Q_{\text{ос}} = K_{\text{dir}} \cdot C_{\text{vof}} \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot \frac{g \cdot V_{\text{ч}} \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}, \quad (2)$$

где K_{dir} – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию (гор – 1, верт. – 0,1), C_{vof} – объемная доля второй фазы, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, g – ускорение свободного падения, $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, η – кинематическая вязкость воздуха ($14,859 \cdot 10^{-6}$), r – радиус частицы.

Определение потока поднимающейся пыли $Q_{\text{под}}$:

$$Q_{\text{под}} = k \cdot W^n \cdot K_{\text{res}} \cdot \sigma, \quad (3)$$

где σ – поверхностное загрязнение ($\text{кг}/\text{м}^2$), k – коэффициент пропорциональности, определяет интенсивность подъема пыли, W – скорость воздуха, K_{res} – коэффициент ресуспензии, n – показатель степени.

Анализ распространения РА при вводе НБК в эксплуатацию. Проведен ряд расчетов на CFD модели НБК и ОУ в ходе которых проведена верификация и уточнение параметров модели по данным измерений 2017, 2018 г., а также рассмотрены сценарии распро-

странения РА во время ввода НБК в эксплуатацию и его эксплуатации.

Целью расчетов было верифицировать CFD модель и настроить ее параметры по измерениям скорости оседания и концентрации РА в ОУ и ОО НБК, проведенным в последнее время.

Анализ измерений и результатов расчетов показывает, что во время ввода НБК в эксплуатацию после герметизации зазоров под стенами НБК, концентрации РА в основном объеме НБК выросли по сравнению с периодом отсутствия герметизирующих мембран, что объясняется уменьшением выноса РА из основного объема НБК с воздушными потоками. Концентрация РА в центральном зале (ЦЗ) ОУ составляет в среднем порядка $1 \text{ Бк}/\text{м}^3$ [4] и в несколько раз выше чем в основном объеме НБК, т.е. крыша ОУ служит барьером для распространения РА.

Источник РА моделируется как объемный источник массы, распределенный по объему полуразрушенных помещений ОУ, вентиляция НБК не функционирует, а гидравлическое сопротивление зазоров между стенами НБК и строениями выбрано таким, чтобы соответствовать состоянию частичной их герметизации, что имело место в 2017-2018 гг. Скорость ветра и температура окружающей среды взяты равными средним за период измерений. Результаты расчетов в сравнении с измерениями приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, результаты расчетов в целом показывают качественную и количественную близость результатов расчетов с результатами проведенных измерений в соответствующие периоды.

В результате расчетов также получены распределе-

Табл. 1. Результаты моделирования в сравнении с осредненными результатами измерений за 2017 г. для периода ввода НБК в эксплуатацию.

Величина	Измерения (2017-2018г)	Модель
Концентрация РА в ОО [Бк/м³]	0,05-0,9	0,46
Концентрация РА в ОУ (система “байпас”), [Бк/м³]	~0,9	0,87
Скорость оседания РА на крыше ОУ, [кБк/(м²·сут)]	~2,0	2,65

ния концентрации РА показанное на рис. 3.

Из результатов расчетов видно, что концентрации РА в основном объеме НБК выросли по сравнению с периодом отсутствия герметизирующих мембран, что объясняется уменьшением выноса РА из объема ОО НБК с воздушными потоками. Рис. 3 показывает, что концентрация РА в ЦЗ ОУ приблизительно в 2 раза выше чем в ОО НБК.

Анализ распространения РА при извлечении и погрузке радиоактивных отходов (РАО) в контейнер. Моделирование выбросов РА во время работ по погрузке

и транспортировке радиоактивных отходов из центрального зала ОС было проведено с учетом возможности осаждения аэрозолей. Расчеты основаны на исходных данных и условиях сценария, описанных авторами статьи [5], которые провели аналогичную оценку на основе аналитического решения дифференциального уравнения баланса РА в основном объеме НБК.

Интенсивность выброса РА (массовая) принята равной 0,316 кг/час. Активность РА составляет $1 \cdot 10^8$ Бк/кг. Таким образом, интенсивность выброса равна $E = 3,16 \cdot 10^7$ Бк/час. Такой выброс происходит пе-

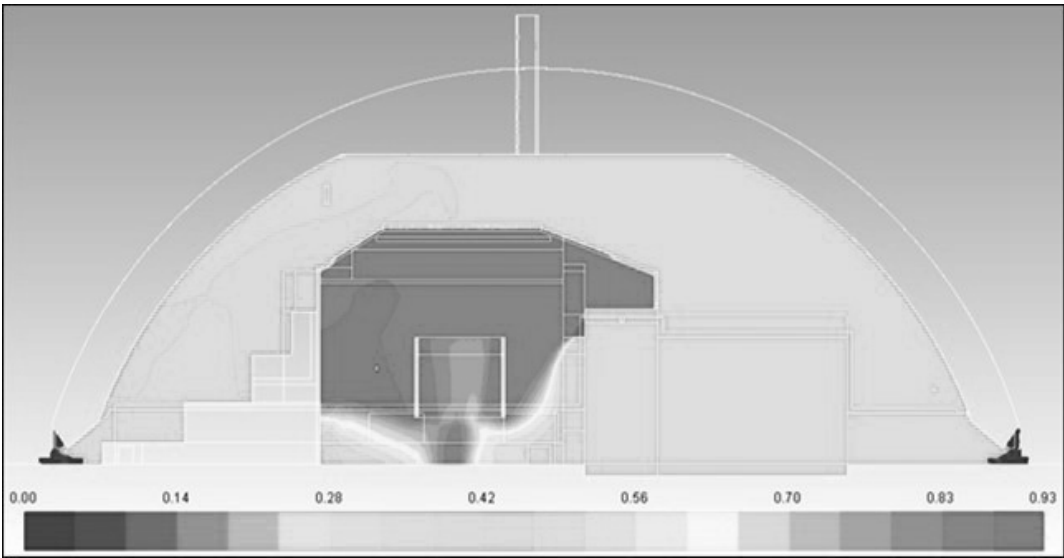


Рис. 3. Распределение концентраций РА (Бк/м³) под НБК в период ввода в эксплуатацию.

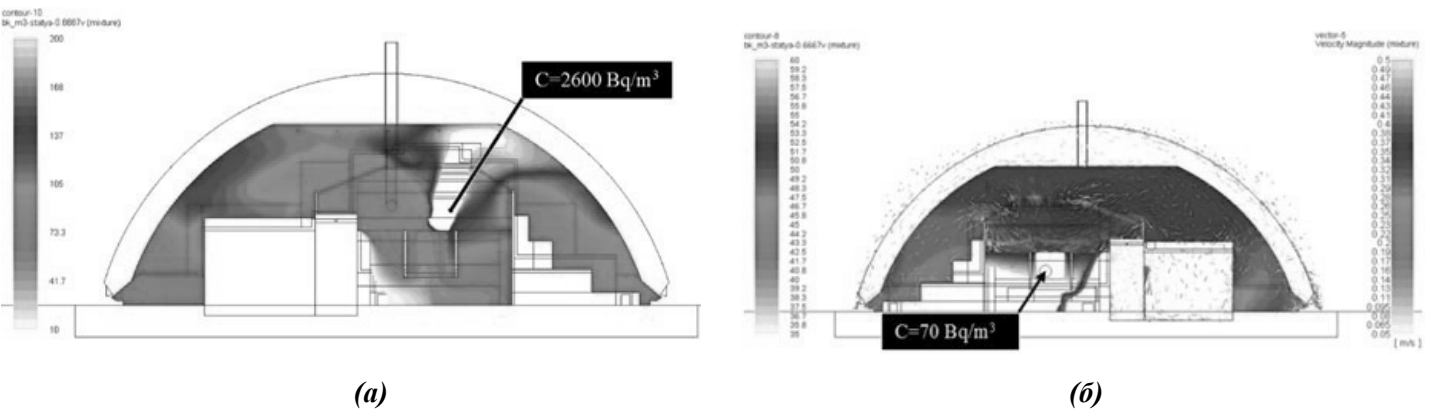


Рис. 4. Концентрации РА (Бк/м³) в объеме НБК после 6 (а) и 12 (б) часов с начала проведения работ.

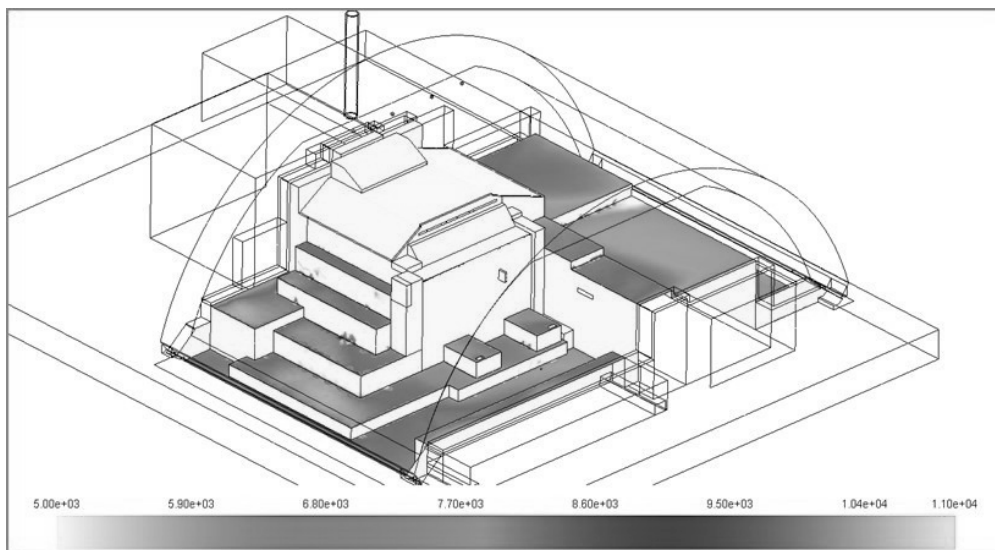


Рис. 5. Поверхностное загрязнение после 10 дней работ по удалению РАО (Бк/м²).

риодически во время работ по погрузке РАО (2 смены по 2 часа с перерывом в 2 часа).

Выделенная пыль распространяется по объему НСК и в конечном итоге высасывается вытяжной вентиляцией (1,4 объема НБК/день) и осаждается на горизонтальных поверхностях основного объема НБК.

В результате расчетов были получены поля концентрации РА в основном объеме НБК в различные моменты времени, представленные на рис. 4.

Учет осаждения позволил получить распределение поверхностного загрязнения после 10 дней работы по удалению РАО (Бк/м²) (рис. 5).

Из результатов расчетов видно, что зависимости средней объемной концентрации РА, полученные в результате моделирования, близки к результатам работы [5], но CFD-модель показала, что локальные концентрации РА вблизи места проведения работ в определенные моменты времени может достигать ~ 2600 Бк/м³, что значительно превышает безопасное значение.

Выводы

1. Результаты моделирования для условий ввода в эксплуатацию НБК демонстрируют близость расчетных и измеренных показателей концентрации РА в центральном зале ОУ, скорости осаждения РА на крыше ОУ, и концентрации в ОО НБК.

2. При рассмотрении сценария повышенного выброса при работах по извлечению РАО из ЦЗ ОУ видно, что за учет осаждения РА приводит к ускорению снижения концентрации РА в ОО НБК во времени. Доля осажденных аэрозолей составляет приблизительно 16% от общего выброса при среднем размере частиц 2 мкм.

Расчеты с другими размерами частиц, например, 5 и 7 мкм, показали, что доля осажденных РА значительно возрастает с ростом размера частиц и может составлять до 30-45% от общего выброса. Сравнение с аналогичной оценкой, проведенной в [4], показало близость осредненных концентраций в ОО НБК, однако в локальных местах отличия могут быть очень существенными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батий В. Г., Егоров В. В., Рубежанский Ю. И. Математическое моделирование процесса распространения радиоактивных аэрозолей внутри радиационно-опасных объектов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2007. – Вып. 7. – С. 55-61.
2. Patankar, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. - Hemisphere Publishing Corporation. - 1980. - P. 214. - ISBN 0891165223.
3. Krukovskyi P., Oliinyk V., Metel M. 3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP // International Journal of Mechanical Engineering. - 2018. - Vol. 3. - P. 109-118.
4. Лагуненко А. С., Хан В. Е., Калиновский А. К., Краснов В. А., Кашир В. А., Довыдьков С. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «УКРЫТИЕ» в 2015 - 2016 гг. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2017. Вып. 29. – С. 69 – 77.
5. Батий В. Г., Сізов А. О., Федорченко Д. В., Холодюк А. О. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта "Укриття" // Ядерна та радіаційна безпека. - 2015. - Вып. 4. - С. 41-44.

ANALYSIS AND PREDICTION OF RADIOACTIVE DUST TRANSFER AT THE NEW SAFE CONFINEMENT OF CHNPP OPERATION

Krukovsky P.G., Metel M.A., Deineko A.I., Skliarenko D.I.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.10>

The purpose of the work is the verification, analysis, and forecasting of the spread of radioactive aerosols (RA) under the New Safe Confinement (NSC) and Shelter object (SO) using the developed computer model. Concentrations of radioactive aerosols are analyzed after turning on the ventilation system and during various activities or events that may be accompanied by increased emissions of RA.

CFD model SO and NSC. One of the methods for analyzing and prediction the behavior of processes within an SO is computer CFD modeling (Computational Fluid Dynamics), which makes it possible to predict the distribution of temperatures, humidity, air velocities and other values, such as concentrations of impurities or phases.

Approach to radioactive aerosol modeling. Radioactive aerosols in the model are presented as one of the phases of a multiphase medium, taking into account the processes of their transfer with air streams, due to diffusion, including turbulent, RA emissions from the central hall of the Shelter and their gradual subsidence under the action of gravity.

Results. The results of analysis and forecasting of the radioactive aerosols (RA) spread in the NSC under various conditions are presented. The conditions for the commissioning NSC, operation, dismantling of the SO (early dismantling) and removal of radioactive waste from the central hall of the SO are considered. Such analysis and forecasting was performed using computer CFD model of the SO and NSC. The model takes into account important physical processes, such as heat, air, humidity and radioactive aerosols (RA) transfer, taking place in the SO and NSC, the necessity of their analysis and forecasting, which eventually determine the safety of people and the 100-year lifetime of the NSC. The model takes into account sedimentation, accumulation and secondary dust emissions on the surfaces under the NSC, which allows obtaining distributions of surface contamination and determine the places of the highest contamination.

References 5, tables 1, figures 5.

Key words: Chernobyl accident, new safe confinement, dismantling of the Shelter, CFD modeling, radioactive aerosol concentration.

1. Batiy V. G., Egorov V. V., Rubezhansky Yu. I. [Mathematical modeling of the propagation process of radioactive aerosols inside radiation-hazardous objects] // Problem bezopastnosti atomnih stanciy i chernobilya [Problems of safety of nuclear power plants and chornobylys]. 2007. №7. P. 55-61. (Rus)

2. Patankar, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. - Hemisphere Publishing Corporation. 1980. P. 214. ISBN 0891165223.

3. Krukovskiy P., Oliynyk V., Metel M. [3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP], International Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 3. P. 109-118.

4. Lagunenka A.S., Khan V.E., Kalinovskiy A.K., Krasnov V.A., Kashpur V.A., Dovydkov S.A. [Control of emissions of radioactive aerosols from the "Shelter" object in 2015 – 2016], Problem bezopastnosti atomnih stanciy i chernobilya [Problems of safety of nuclear power plants and chornobylys]. 2017. №29. P. 69 - 77. (Rus).

5. Batiy V.G., Sizov A.O., Fedorchenko D.V., Holodyuk A.O. [Dynamics of changes in concentration of radioactive aerosols during removal of fuel-containing materials from the "Shelter" object], Yadernaya i radiacionaya bezopastnost [Nuclear and radiation safety]. 2015. №4. P. 41-44. (Ukr).

Отримано 09.11.2018

Received 09.11.2018

УДК 620.92

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА ДОМОГОСПОДАРСТВАМИ ТА НЕПРОМИСЛОВИМИ СПОЖИВАЧАМИ

Радченко С.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.11>

Представлено аналіз даних щодо використання населенням, сільським господарством та сферою торгівлі й послуг таких видів палива як вугілля й торф, нафтопродукти, природний газ, біопалива та відходи. Виконано порівняння окремих показників Енергетичного балансу і статистичних даних по Україні та світу.

Представлен анализ данных об использовании населением, сельским хозяйством, сферой торговли и услуг таких видов топлива как уголь и торф, нефтепродукты, природный газ, биотоплива и отходы. Выполнено сравнение отдельных показателей Энергетического баланса и статистических данных по Украине и миру.

The data analysis of fuels utilization such as coal and peat, oil products, natural gas, biofuels and waste by the population, agriculture, commerce and public services sector is presented. The statistical data and Energy Balance's selected indicators of Ukraine and the world were compared.

Бібл. 6, рис. 8.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, біопалива, енергоспоживання.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

н.е. – нафтовий еквівалент.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розуміння поточного стану у споживанні основних видів палива домогосподарствами України для оцінки перспектив переведення населення на низьковуглецеві палива та зменшення викидів парникових газів.

Метою роботи є аналіз наявних статистичних даних щодо споживання палива населенням по регіонах України; порівняння структури кінцевого енергоспоживання в Україні та світі для виявлення схожості та розбіжностей в тенденціях розвитку.

Визначення ступеню поширення індивідуальних систем опалення в Україні та аналіз споживання основних видів палива побутовим сектором

Згідно статистичних даних [1] близько 37% домогосподарств в Україні опалюються від індивідуальних установок та печей. На рис. 1 представлені дані по долі квартир у житлових будинках та нежитлових будівлях, які обладнані системами індивідуального опалення та пічками з розподіленням по областях.

Треба відмітити, що із 24 представлених областей в 10 доля домогосподарств, що опалюються індивідуально, перевищує 50%.

В пошуках відповіді на питання: «Які види палива та в яких пропорціях споживають українські домогосподарства?» були зведені та проаналізовані дані державних статистичних спостережень, що ведуться за встановленими формами. Для означеного завдання робота велась з розділом 4 «Кінцеве споживання енергетичних матеріалів та продуктів перероблення нафти», що є частиною форми № 4-МТП (річна) «Звіт про залишки і використання енергетичних матеріалів та продуктів перероблення нафти». Завдяки цьому вдалось

визначити структуру споживання та обсяги палива, реалізованого підприємствами й організаціями населенню для задоволення його побутових потреб.

З діаграми, що наведена на рис. 2, видно, що основним паливом, яке використовує населення, є природний газ. Узагальнення по Україні дає наступні показники: природний газ для побутових потреб використовують 87% населення, біопалива та відходи споживають для опалення 10% домогосподарств, 3% будинків опалюються за рахунок використання вугілля й торфу.

По даним Держстату у 2015 році в Україні 32% спожитих населенням дров було реалізовано домогосподарствам підприємствами, а 68% – обсяг одержаних від самозаготівлі дров, колод, хмизу. При розрахунках діаграм, що наведені на рисунках 2, 3, самозаготівля була врахована.

Порівнюючи рис. 1 та 3, можна зробити висновок, що доля домогосподарств, які не приєднані до системи централізованого теплопостачання, не є домінуючим фактором при оцінці об'ємів споживання ними палива. На прикладі Дніпропетровської області видно, що лише 17% будинків, які опалювались від індивідуальних установок та печей, спожили близько 900 тис. т н.е. палива (це один з найвищих показників серед областей). Для більшого розуміння даної ситуації необхідно додатково проаналізувати наступні фактори: чисельність домогосподарств та населення по регіонах, ККД обладнання, що використовується, кліматичні умови регіону. До того ж статистичні дані про споживання біопалива в основному ґрунтуються на інформації про споживання дров та біомаси деревного походження. Це пояснює

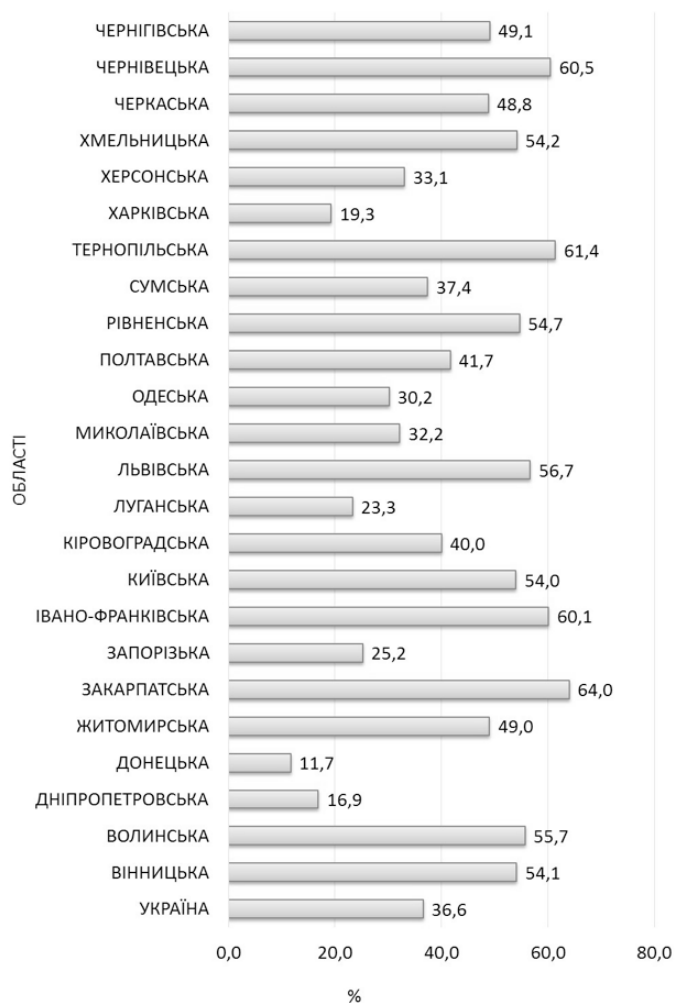


Рис. 1. Доля будинків, що опалювались від індивідуальних установок та печей в міських поселеннях та сільській місцевості у 2015 році.

більш високий відсоток споживання біопалива в областях, що розташовані у лісистих зонах.

Порівняння структури кінцевого енергоспоживання в Україні та світі

Якщо рухатись в напрямку більш узагальнених показників кінцевого енергоспоживання, що формують Енергетичний баланс, то логічним буде зупинитись на розгляданні блоку «Інші», до якого віднесені наступні складові: побутовий сектор, торгівля та послуги, сільське господарство, рибальство, інші споживачі. Слід відмітити, що вітчизняний Держстат дотримується міжнародних стандартів при складанні енергобалансу країни, тому можливе порівняння деяких тенденцій розвитку в Україні та світі.

Були проаналізовані дані Енергетичного балансу за 2015 рік щодо споживання чотирьох основних видів палива (вугілля й торф, нафтопродукти, природний газ, біопаливо та відходи) в пункті «Інші». З наведених на рис. 4 даних видно, що пропорційність споживан-

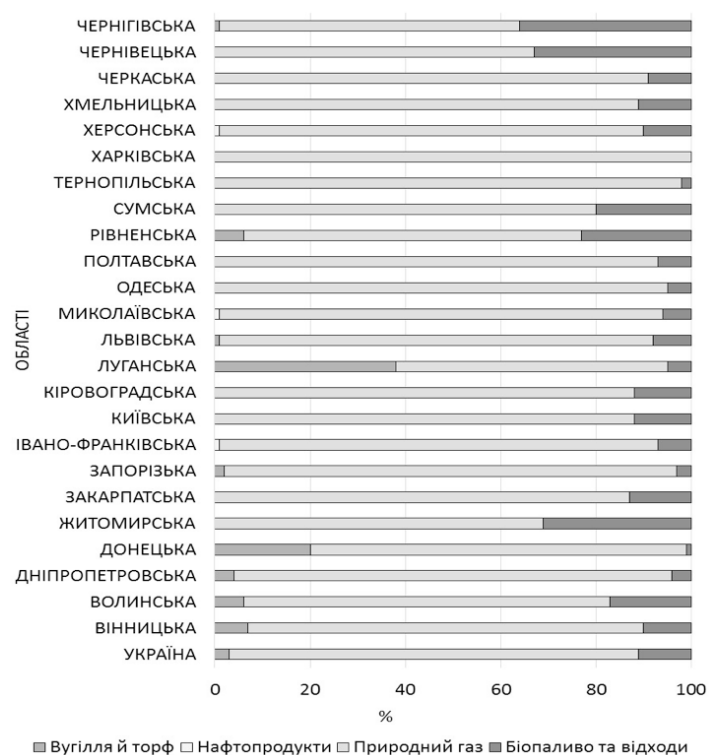


Рис. 2. Дані про структуру споживання основних видів палива побутовим сектором у 2015 р.

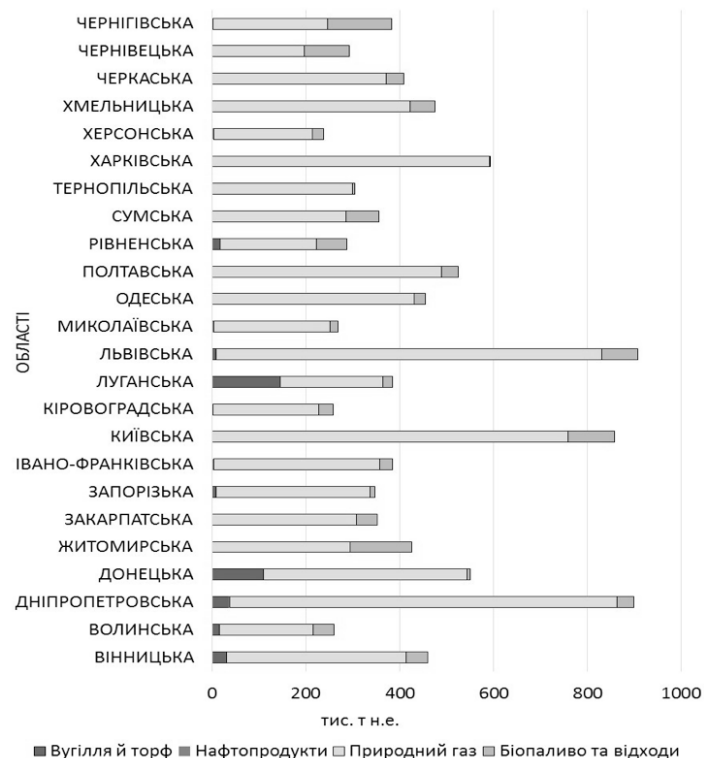


Рис. 3. Розподіл по областям України споживання палива побутовим сектором у 2015 році.

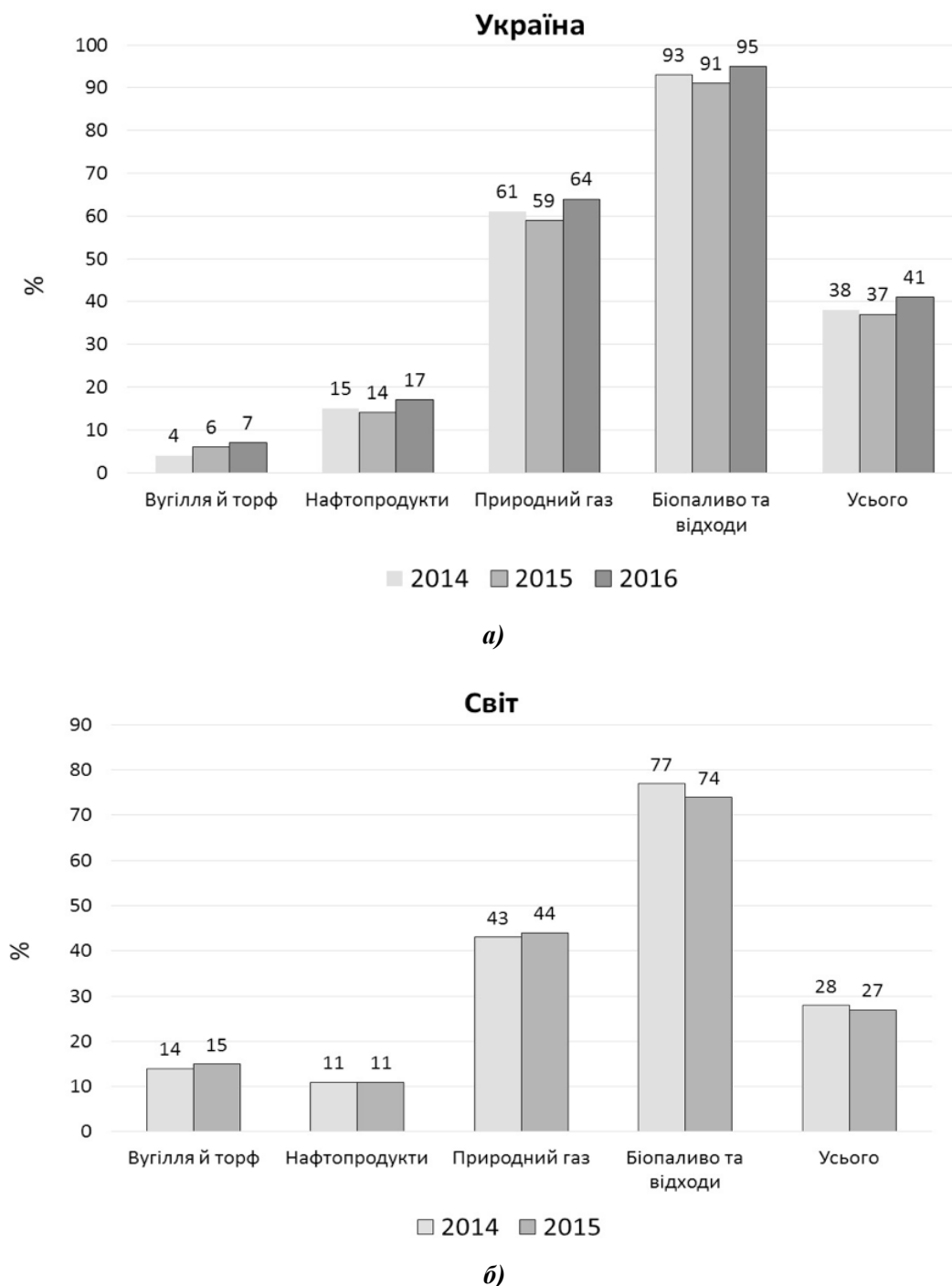


Рис. 4. Відносні долі сектору "Інші" від кінцевого споживання по обраним видам палива, що розраховані за даними Енергетичного балансу для України (а) та світу (б) [2,3,4].

ня основних видів палива в Україні взагалі відповідає світовим тенденціям.

В нашій країні, як і в світі, непромислові споживачі палива використовують основну частину біопалива та відходів. Споживання природного газу в Україні дещо вище, ніж в середньому у світі, але відсоток використання вугілля й торфу в 2 рази менше.

Згідно узагальнень даних по Енергетичному балансу в світі, що зробили автори [5], за період з 1971 по 2015 рік загальне кінцеве споживання збільшилося більш, ніж удвічі (з 4244 млн. т н.е. до 9384 млн. т н.е.). При цьому у відносних долях кінцеве енергоспоживання з урахуванням галузей економіки практично не змінилось (рис. 5 а, б). Енергетичне використання

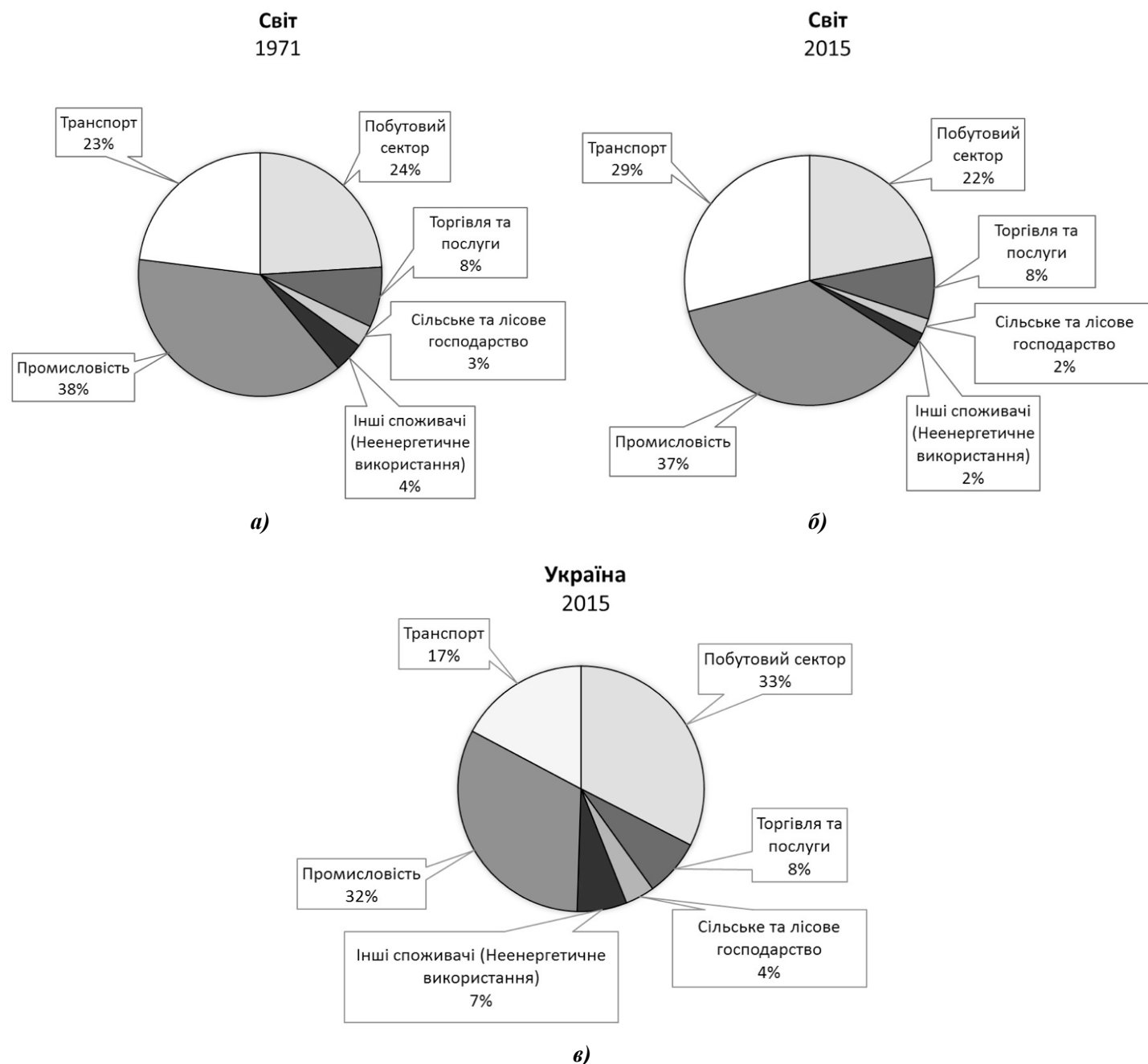


Рис. 5. Загальне кінцеве споживання з розподіленням по секторам для світу (а), (б) та України (в) [2, 5].

транспортним сектором значно збільшилось, з 23% у 1971 р. до 29% у 2015 р. Проте, у 2015 р. промисловість залишалась найбільшим сектором споживання, лише на один процент знизивши значення у порівнянні з 1971 р. Житловий сектор займав в 2015 році третє місце з показником 22%.

Порівнюючи дані по Україні та світу (рис. 5 б, в), необхідно відмітити, що згідно світовій тенденції доля споживання транспортом збільшується, а доля споживання побутовим сектором зменшується і транспортний сектор в 2015 році споживав на 7% енергії більше, ніж

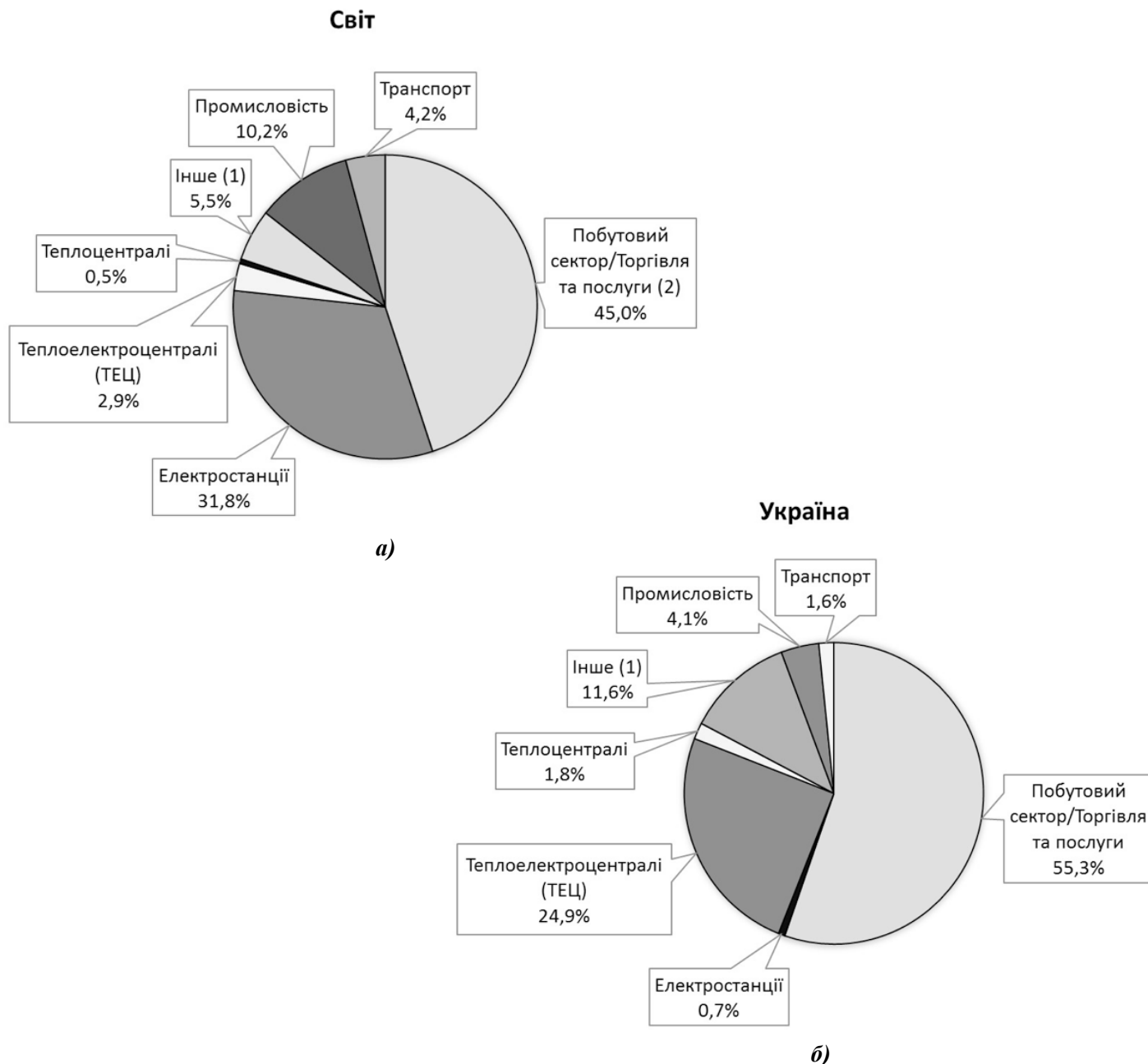
побутовий. В Україні ж побутовий сектор споживає практично вдвічі більше енергії, ніж транспорт (33% та 17% відповідно). Доля торгівлі та послуг в Україні і світі співпадають (8%). Сільське та лісове господарство в Україні споживає вдвічі більше, ніж світовий показник (4% у порівнянні з 2%). В сумі промисловість та інші споживачі використовують однаково 39% енергії і в Україні і в світі, однак в Україні на 5% більше витрачається на неенергетичне використання (в основному природний газ та нафтопродукти використовуються як сировина для промисловості).

Використання відновлюваних джерел енергії побутовими споживачами

По даним [6] у світі більшість відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) використовується побутовими споживачами, сектором торгівлі та послуг, сільським господарством та іншими. Це пояснюється широким використанням твердого біопалива домогосподарствами країн, що розвиваються.

По даним діаграми з рис. 6 (а) фактично у світі трохи більше 35% ВДЕ використовується для виробництва теплової та електричної енергії, а 45% споживається у домогосподарствах, сферою торгівлі та послуг, сільським і лісовим господарствами, рибальством та іншими споживачами.

У порівнянні з аналогічними даними по Україні побутовий сектор разом з віднесеними до нього споживачами



(1) Інші перетворення, власне використання енергетичної галузі, втрати;
 (2) включаючи дані про сільське та лісове господарство, рибальство та інших споживачів.
 Примітка: загальна сума у графіках може не дорівнювати 100% через округлення.

Рис. 6. Споживання відновлюваних джерел енергії у 2015 році з розподіленням по секторам для світу (а) та України (б) [2, 6].

чами використовує більше 55% ВДЕ, а на виробництво тепла та електроенергії витрачається менше 28%.

Для того щоб прослідкувати які зміни за останнє десятиріччя стались в структурному розподіленні споживання палива, наведено діаграму на рис. 7.

Треба відмітити зростання долі споживання біопалива та відходів і зменшення долі споживання природного газу. До того ж крива зменшення споживання вугілля і торфу за період 2005-2016 рр. практично повторює криву зростання споживання біопалива тільки з протилежним знаком.

Підпункти рибальство та інші споживачі практично не дають внеску, тому залишимо для подальшого розгляду наступні підпункти: побутовий сектор, торгівля та послуги, сільське господарство.

Як видно з діаграми, що представлена на рисунку 8, останніми роками збільшення споживання біопалива та відходів в основному відбувається за рахунок побутового сектору. До того ж двократне зростання у 2016 році відповідно до значень попередніх років показав сектор торгівлі та послуг. Досі в достатній мірі не використовується в енергетичних цілях значний власний потенціал біомаси у сільському господарстві.

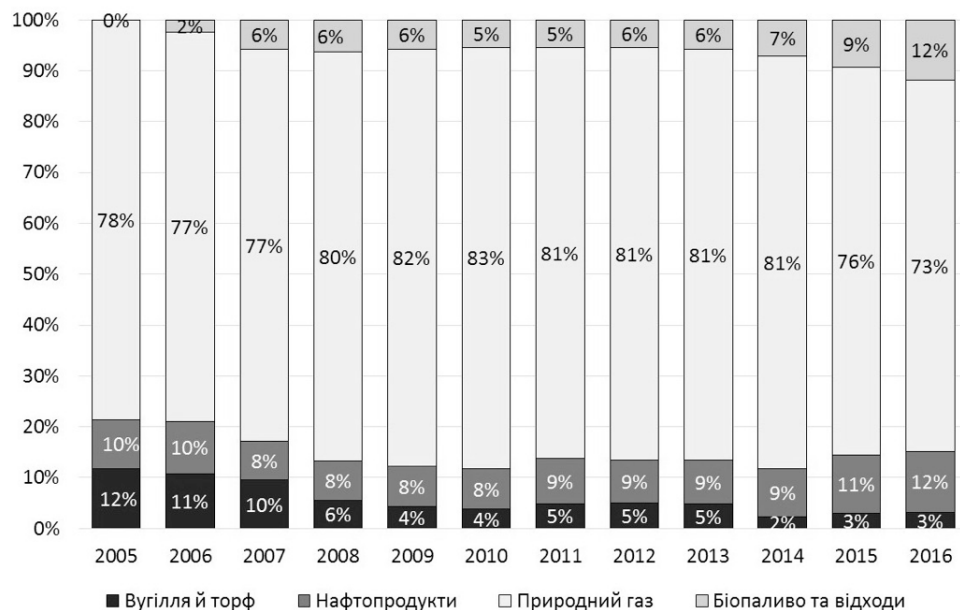


Рис. 7. Споживання палива на непромислові потреби в енергетичному балансі України.

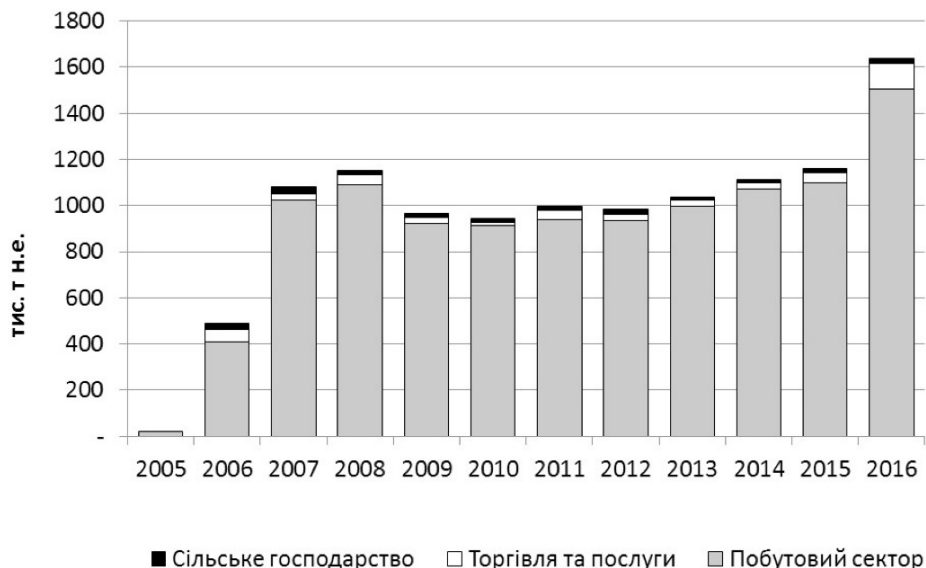


Рис. 8. Дані про споживання біопалива та відходів в енергетичному балансі України.

Висновки

Узагальнюючи наведене в статті, можна зробити висновок, що основним паливом, яке використовує населення в Україні, є природний газ (87%). В той же час у нашій країні, як і в світі, непромислові споживачі палива використовують основну частину біопалива та відходів. За останнє десятиріччя для побутових потреб стали споживати вдвічі більше біопалива, і воно все активніше заміщує вугільні палива, що безперечно має позитивний вплив на навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Статистичний бюлетень «Житловий фонд України»* у 2015 році, Державна служба статистики України, Київ 2016, www.ukrstat.gov.ua
2. *Енергетичний баланс України за 2005 - 2016 роки*, Державна служба статистики України, Київ 2016, www.ukrstat.gov.ua

3. *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2016*/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016 - 80 p. <http://www.iea.org/t&c/>

4. *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2017*/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017 - 95 p. <http://www.iea.org/t&c/>

5. *WORLD ENERGY BALANCES: OVERVIEW (2017 edition)*/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017 - 21 p. <http://www.iea.org/t&c/>

6. *RENEWABLES INFORMATION: OVERVIEW (2017 edition)*/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017 - 11 p. <http://www.iea.org/t&c/>

ANALYSIS OF THE USE OF FUEL BY HOUSEHOLDS AND NON-INDUSTRIAL CONSUMERS

Radchenko S.V.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.11>

Purpose of the paper is to analyze the available statistical data on fuel consumption by population in every region of Ukraine. To identify similarities and differences in development trends the comparison of structure of final energy consumption in Ukraine and the world was done. The degree of distribution of individual heating systems in urban settlements and rural areas in 2015 is determined. Analysis of the use of the main types of fuel by households sector in regions of Ukraine is performed. The amount of fuel consumed by the population does not linearly depend on the share of individual heating systems in the region (this was shown by an example), therefore to develop strategy for extending the use of renewable energy sources (RES) in the households more factors will need to be considered. Ukrainian and world energy balance data for 2015 (item "Other" which includes residential sector, commerce and public services, agriculture, fishing, other consumers) on the consumption of four main types of fuel (coal and peat, oil products, natural gas, biofuels and waste) were compared. It was concluded that in Ukraine the proportion of basic fuels consumption corresponds to world trends. However, after analyzing the distribution of total final energy consumption certain differences were observed. Analysis of renewable energy sources use by sectors has demonstrated that the residential sector is the leader in renewable energy sources consumption both in the world and in Ukraine. In Ukraine statistical data on biofuel consumption is mainly based on information about firewood and wood biomass consumption. This explains the higher percentage of biofuel consumption in forested areas. It should also be noted that in Ukraine 32% of the wood used by population was sold to

households by enterprises and 68% was obtained from self-preparation. Over the past decade consumption of biomass fuel for household needs in Ukraine has doubled, and it is increasingly replacing coal fuel, thus exerting a positive impact on the environment.

References 6, Figures 8.

Key words: renewable energy sources, biomass fuel, biofuel, energy consumption

1. *Statystychnyy byuleten' «Zhytlovyy fond Ukrainy» u 2015 rotsi*, Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, Kyiv, www.ukrstat.gov.ua [The statistical bulletin "Housing Fund of Ukraine" for 2015, State Statistics Service of Ukraine, Kyiv] (Ukr.)
2. *Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2005 - 2016 roky*, Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, Kyiv, www.ukrstat.gov.ua [Energy balance of Ukraine for 2005-2016, State Statistics Service of Ukraine, Kyiv] (Ukr.)
3. *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2016/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2016 - 80 p. <http://www.iea.org/t&c/>
4. *KEY WORLD ENERGY STATISTICS 2017/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2017 - 95 p. <http://www.iea.org/t&c/>
5. *WORLD ENERGY BALANCES: OVERVIEW (2017 edition)/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2017 - 21 p. <http://www.iea.org/t&c/>
6. *RENEWABLES INFORMATION: OVERVIEW (2017 edition)/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2017 - 11 p. <http://www.iea.org/t&c/>

Отримано 03.07.2018
Received 03.07.2018

УДК 661.68, 661.666, 66.088

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ МЕТАНУ В ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Сімейко К.В., канд. техн. наук

Інститут газу НАН України, вул. Дегтярівська, 39, 03113, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.12>

Наведено термодинамічні розрахунки процесу піролізу метану. Створені експериментальні установки з електротермічним псевдозрідженим шаром. Проведені експериментальні дослідження даного процесу та співставлені експериментальні дані з розрахунковими. Порівняльний аналіз різних типів реакторів з електротермічним псевдозрідженим шаром був проведений на основі теплофізичних характеристик процесу піролізу метану.

Приведены термодинамические расчеты процесса пиролиза метана. Созданы экспериментальные установки с электротермическим псевдоожженным слоем. Проведены экспериментальные исследования данного процесса и сопоставлены экспериментальные данные с расчетными. Сравнительный анализ разных типов реакторов с электротермическим псевдоожженным слоем был проведен на основе теплофизических характеристик процесса пиролиза метана.

Thermodynamic calculations of the process of methane pyrolysis are given. Experimental plants with electrothermal fluidized bed have been created. Experimental studies of this process had been carried out and experimental data were compared with the calculations. Comparative analysis of different types of reactors with electrothermal fluidized bed has been based on thermophysical characteristics of the process of methane pyrolysis.

Бібл. 18, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: метан, піроліз, електротермічний псевдозріджений шар, водень, піровуглець.

d – діаметр частинок кварцового піску, м;
 E – повна внутрішня енергія, кДж/кг;
 F – площа перерізу реакційної зони, м²;
 G_{CH_4} – витрата метану, м³/с;
 I – ентальпія, кДж/кг;
 k – коефіцієнт переведення у мольні частки або об'ємні частки, кг/кмоль або кг/м³;
 M – кількість індивідуальних речовин (газів) у вихідній суміші;
 N – число псевдозрідження;
 Nu – критерій Нуссельта;
 Re – критерій Рейнольдса;

w – швидкість потоку газу, м/с;
 $w_{кр.}$ – швидкість початку псевдозрідження, м/с;
 ΔC – кількість вуглецю, яка залишилася в реакторі, г·атом;
 ΣC і ΣH – молярні кількості вуглецю і водню, г·атом;
 v_{CH_4} – в'язкість метану, Па·с;
 σ_C, σ_H – коефіцієнти, що визначають кількість атомів C або H в i -му газі;
 x_i – молярні частки i -го газу, %_{об.};
 ψ – співвідношення вуглець/водень;
 ЕТПШ – електротермічний псевдозріджений шар.

Вступ

Питання раціонального і ефективного використання вуглеводневої сировини давно є предметом інтенсивних і різнопланових досліджень вчених. Основними продуктами під час високотемпературного піролізу метану є вуглець та водень. Відповідно до класифікації П.А. Теснера [1] існують два типи піровуглецю, структура та властивості яких визначаються температурами утворення: низькотемпературний (800...1100 °С) і високотемпературний (1400...2200 °С). В іншому джерелі [2], вуглецеві покриття, утворені шляхом розкладання вуглеводнів при температурах 800...1400 °С називають піровуглем, а відкладення, утворені при температурах 1900...2200 °С – пірографітом. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям піровуглець та пірографіт можуть застосовуватись у атомній енергетиці, спецметалургії, машинобудуванні, ра-

кетобудівництві, медицині, реакторобудуванні, електротехніці [3]. Водень є енергетично вигідним та екологічно чистим енергоносієм. Крім енергетики водень знаходить застосування в багатьох галузях: у хімічному синтезі, термічній обробці металів і т.п.. Враховуючи важливу прикладну цінність продуктів процесу піролізу метану дослідження у цьому напрямі є актуальними.

Аналіз літератури. Дослідження піролізу вуглеводневих газів у реакторах з електротермічним псевдозрідженим шаром (ЕТПШ) проводили наступні вчені: Махорін К.Е., Курбаков С.Д., Кожан О.П., Богомолов В.А., Сукачев А.І., Карлін В.В. та ін. На деякий час науковий інтерес до цього напрямку згас. Але зараз, завдяки актуальним запитам енергетики, матеріалознавства, нанотехнологій та інш. цей інтерес відновився. Дослідженню теплофізичних характеристик, механізмів та кінетики утворення піровуглецю і пірографіту при-

свячена велика кількість робіт, у т.ч. Теснера П.А., Becker A.K., Huttering K.J., Сачкова В.А., Магарила Р.З., Гуріна В.А., Гуріна І.В., С.Ю. Сасенка та ін. Аналіз останніх публікацій показав, що на даний час проводяться дослідження з кінетики процесу піролізу [4-8], каталітичного синтезу вуглецевих наноматеріалів [9], дослідженню утворення і структури вуглецевих фаз [10-11]. Незважаючи на велику кількість робіт з дослідження піролізу метану, проведення даного процесу у електротермічному псевдозрідженому шарі вивчено недостатньо.

Метою дослідження описаного в статті є визначення теплофізичних характеристик процесу піролізу метану (основні продукти реакції водень та піровуглець) у реакторах з різним типом ЕТПШ.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтуються на експериментальних методах вивчення піролізу вуглеводневих газів в ЕТПШ. Аналіз складу вихідного та скидного газу визначався за допомогою хроматографу Agilent 6890 N (США). Термодинамічні розрахунки проводилися з використанням програми TERRA. Для опису процесів в електротермічному псевдоожиженому шарі використовувалися методи теорії тепломасообміну.

Розрахункова частина. Рівноважний склад продуктів піролізу метану розрахований за допомогою програми TERRA (пунктирні лінії на рис.2) показав, що кількість виходу вуглецю і водню після 1000 К практично не змінюється.

Повна ентальпія і повна внутрішня енергія є адитивними функціями, тому вони можуть обчислені як сума всіх простих речовин, що утворюють систему (рис. 1).

Як видно з рис. 1 значне збільшення I та E відбувається у діапазоні з 700 до 1000 К, що свідчить про

інтенсифікацію процесу.

На основі проведених розрахунків температура повного розкладання метану на вуглець та водень 800 К, однак при даній температурі вуглець утворюється у вигляді сажі (технічного вуглецю), тому аналізуючи літературні дані [1-2] було обрано базовий температурний інтервал досліджень 973 – 1373 К ($\approx 700 \dots 1100^\circ\text{C}$).

Експериментальна частина. Дослідження процесу піролізу метану проводився на лабораторній установці де у якості зовнішнього нагрівача (ЗН) використовується кільцевий електротермічний псевдозріджений шар [12] та на пілотній установці «класичним» електротермічним псевдозрідженим шаром [13]. У якості матеріалу, на який осаджувався піровуглець використовували кварцовий пісок. У результаті проведених експериментів були одержані наступні експериментальні дані (табл.1, табл.2).

Більш детальна інформація про експериментальну частину, технічну складову процесу та характеристики нанесеного піровуглецевого покриття наведена у [3, 14, 15].

Обробка експериментальних даних. Для визначення вмісту вуглецю, який осаджується в результаті процесу, розроблена методика, яка дозволяє на основі даних газового аналізу, визначати кількість осадженого вуглецю. Причиною, яка вимагає створення такої методики є те, що в експерименті досить легко виміряти кількість газів на вході в реактор ЕТПШ і важко точно визначити кількість газу, що виходить з реактору. Тому не можливо збалансувати кількість вуглецю яка поступає і виходить з реактору.

Для вирішення поставленої задачі використовується атомно-молярні співвідношення елементів, що утворюють газову фазу, в нашому випадку це співвідношення

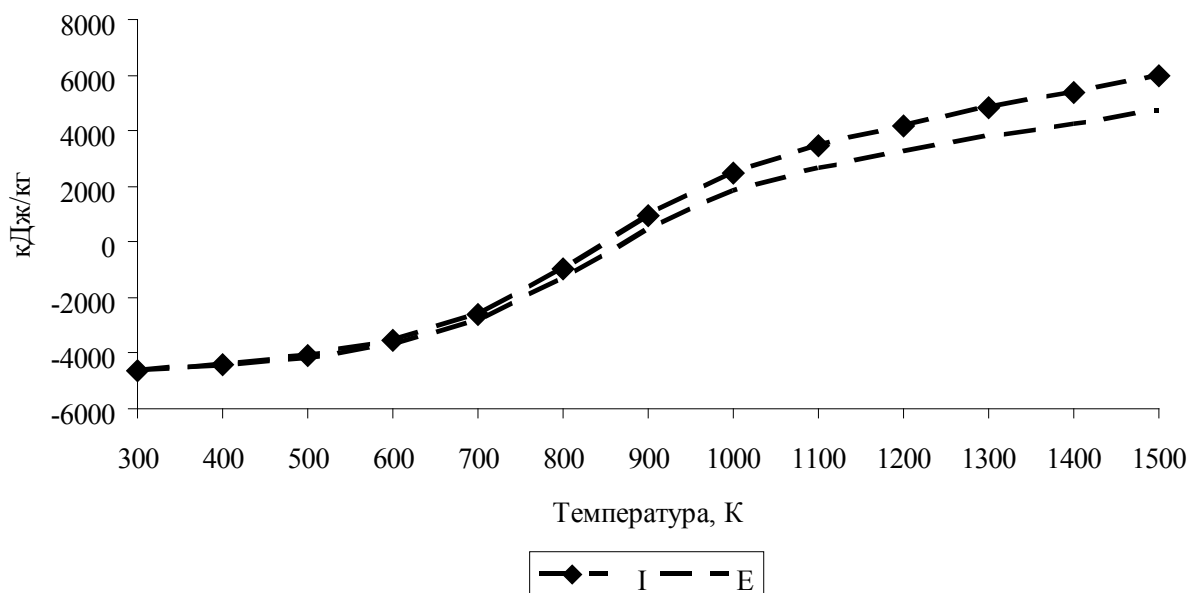


Рис. 1. Залежність повної ентальпії (I) та повної внутрішньої енергії (E) від температури піролізу метану.

Таблиця 1. Результати піролізу метану у лабораторній установці з зовнішнім нагріванням ЕТПШ [17]

		CH ₄	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	CO ₂	H ₂ O
на вході, %об.		88,56	0	0	0	7,58	0,03	1,26	0,14	0,24	0,97	1,22
на виході, %об.	973 K	77,07	15,72	0	0,96	3,40	0,15	0,39	0	0,05	0,60	1,62
	1273 K	56,10	39,14	1,21	1,25	0	0,03	0	0	0	0,28	1,82
	1373 K	42,96	53,11	1,12	0,78	0	0	0	0	0	0,15	1,88

Таблиця 2. Результати піролізу метану у пілотній установці з «класичним» ЕТПШ [18]

		CH ₄	H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	CO ₂	H ₂ O
на вході, %об.		97,09	0	0	0	2,27	0	0	0	0	0,05	0,58
на виході, %об.	1073 K	68,08	29,12	0	1,40	0,43	0	0	0	0	0,97	0
	1173 K	54,10	42,84	0	1,46	0,43	0	0	0	0	1,17	0
	1373 K	32,99	65,75	0	0,58	0,11	0	0	0	0	0,57	0

між кількістю вуглецю та водню. Для вуглеводневої газової фази будь якою складності, з числом компонентів M і об'ємом, наприклад, 1 нм³ можна записати:

$$\sum C = \sum_{i=1}^M x_i \cdot \sigma_{Ci}, \quad (1)$$

$$\sum H = \sum_{i=1}^M x_i \cdot \sigma_{Hi}, \quad (2)$$

де $\sum C$ і $\sum H$ молярні кількості вуглецю і водню, σ_{Ci} , σ_{Hi} – коефіцієнти, що визначають кількість атомів C або H в i -му газі, M – кількість індивідуальних речовин (газів) у вихідній суміші.

Тоді, наприклад, для суміші, що складається з CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, C_nH_m ... молярні кількості вуглецю і водню визначаються так:

$$\sum C = x_{CO} + x_{CO_2} + x_{CH_4} + n \cdot x_{C_nH_m} \dots, \quad (3)$$

$$\sum H = 4x_{CH_4} + 6x_{C_2H_6} + 8x_{C_3H_8} + m \cdot x_{C_nH_m} \dots, \quad (4)$$

де x_i – це величини, які беруться з газового аналізу, який зазвичай визначається у процентах об'єму V_p , %об

Для вихідного і скидного газу співвідношення вуглець/водень, у загальному випадку будуть різні:

$$\psi' = \frac{\sum C'}{\sum H'}, \quad (5)$$

$$\psi'' = \frac{\sum C''}{\sum H''}, \quad (6)$$

де ψ' – співвідношення для вихідного газу, ψ'' – співвідношення для скидного газу, $\sum C''$ можна визначити наступним чином:

$$\sum C'' = \sum C' - \Delta C, \quad (7)$$

де ΔC – кількість вуглецю, яка залишилася в реакторі. Відношення $\sum C'' / \sum H''$ вираховується з даних газового аналізу, його величина не залежить від кількості скидного газу, а визначається тільки його складом.

Зважаючи на те, що кількість атомів водню, або маса водню, що проходить через реактор залишаються без зміни можна записати, що

$$\frac{\sum C' - \Delta C}{\sum H'} = \psi'', \quad (8)$$

звідки одержується формула, яка визначає кількість вуглецю осадженого в реакторі в розрахунку на моль або на 1 нм³ вихідного газу:

$$\Delta C = (\sum C' - \psi'' \cdot \sum H') \cdot k_c, \quad (9)$$

де $k_c = 12$ кг/кмоль, або 0,535 кг/нм³.

На основі описаних вище розрахунків одержано кількість утвореного вуглецю, який переведено в мольні співвідношення. Результати узагальнено і порівняно з розрахунками програми TERRA (рис. 2). Оскільки предметом дослідження є такі продукти піролізу як піровуглець та водень, вміст інших гомологів метану у графік на рис. 2 включено не було.

Як видно з рис. 2 більш ефективно процес піролізу метану проходить у реакторі пілотної установи з класичним ЕТПШ. Інтенсифікацію процесу можна

пояснити впливом плазми мікророзряду між частинками псевдозрідженого шару та прямою генерацією теплоти в реакційній зоні реактору. Різниця з розрахунковими даними пояснюється невеликим часом контакту метану з реакційною зоною реактору.

Критерій Нуссельта визначається наступним чином:

$$Nu = 0,461 \cdot Re^{0,82} \cdot N^{-1}, \quad (10)$$

$$Re = \frac{w_{кр.} \cdot d}{\nu_{CH_4}}, \quad (11)$$

$$w_{кр.} = \frac{G_{CH_4}}{3600 \cdot F}, \quad (12)$$

$$N = \frac{w}{w_{кр}}, \quad (11)$$

$$w = \frac{G_{CH_4}}{F}, \quad (12)$$

Результати розрахунку наведені у порівняльній таблиці 3. Даний розрахунок є умовним, адже не враховується вплив плазми мікророзряду на нагрівання частинок кварцевого піску.

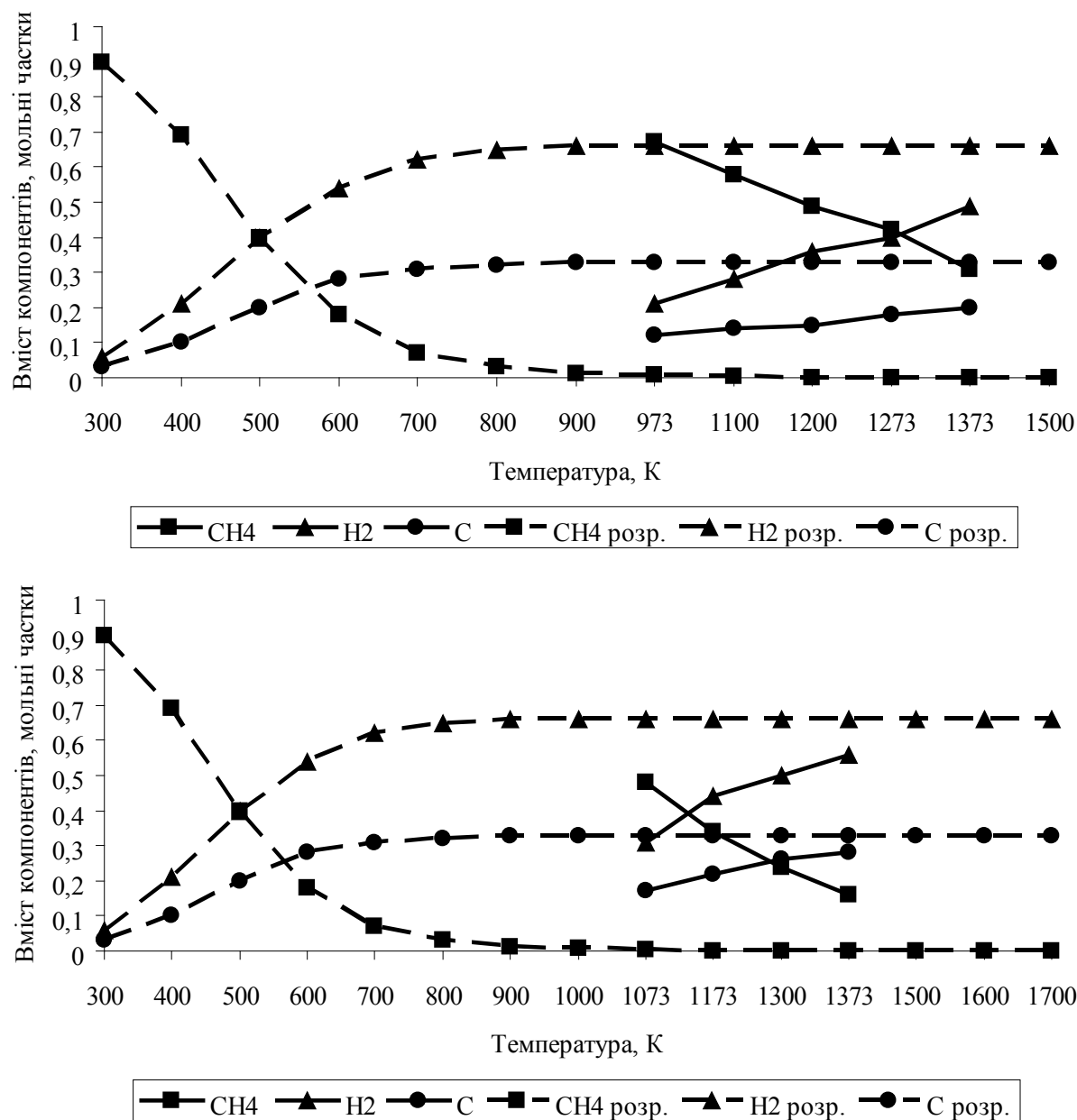


Рис. 2. Залежність вмісту компонентів скидного газу та утвореного вуглецю від температури: а – лабораторна установка з зовнішнім нагріванням, б – пілотна установка з «класичним» ЕТПШ.

Таблиця 3. Порівняльна характеристика реакторів з ЕТПШ

Реактор/ показник	Nu	Термічний ККД	Вихід на режим 1073 К, хв.	Утворення водню при 1373 К, %об.	Утворення твердого вуглецю при 1373 К, мольні частки	Ефективність утворення твердого вуглецю (ef_c)
Лабораторна установка з зовнішнім ЕТПШ	39,5	31,8 [15]	35 [15]	53,11	0,2	0,4 [17]
Пілотна установка з класичним ЕТПШ	12	55,09 [16]	≈150 [16]	65,75	0,28	0,49 [17]

Порівняння показників ефективності процесу піролізу метану в реакторах з ЕТПШ наведено у табл. 3.

Як показує табл. 3 ефективніше проводити процес піролізу метану у реакторі з класичним ЕТПШ. Однак в реакторі з класичним ЕТПШ для розігріву реактору необхідно використовувати електропровідний дисперсний матеріал (зазвичай подрібнений електродний графіт), що може внести додаткові домішки у кінцевий продукт. У реакторі де у якості зовнішнього нагрівача використовується ЕТПШ, даної необхідності немає. Поєднання даних технічних рішень реалізовано у [18], на разі проходять експериментальні дослідження роботоспроможності даного реактору.

Висновки

1. На підставі проведених термодинамічних розрахунків рівноважні температури практично повного розкладу метану знаходяться в інтервалі 973...1373 К ($\approx 700...1100^\circ\text{C}$).

2. Розроблена і реалізована методика розрахунку кількості вуглецю який виділяється газами у процесі піролізу для випадків коли неможливо виміряти кількість високотемпературних скидних газів.

3. Показано, що електротермічний нагрів псевдозрідженого шару електропровідних частинок є набагато ефективнішим ніж зовнішній нагрів псевдозрідженого шару. Це пояснено прямим впливом плазми мікророзрядів і перевагами генерації тепла безпосередньо в середині псевдозрідженого шару.

На підставі проведених досліджень розроблена конструкційна схема реактору з ЕТПШ, який дозволяє використовувати одночасно і зовнішнє нагрівання і класичний ЕТПШ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. – М.: Химия, 1972. – 321 с.
2. Степанов Ю.Б. Образование и удаление отложенный пироуглерода (графита) в коксовых печах / Ю.Б. Степанов, Н.А. Беркутов, В.Н. Круглов // Кокс и химия. – 2001. – № 8. – С. 18–26.

3. Семейко К.В. Исследование характеристик и свойств пироуглеродных покрытий // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2018. – № 1. – С. 37 – 43.

4. Miroslaw Dors, Helena Nowakowska, Mariusz Jasiński, Jerzy Mizeraczyk Chemical Kinetics of Methane Pyrolysis in Microwave Plasma at Atmospheric Pressure // Plasma Chemistry and Plasma Processing. Volume 34, Issue 2, 2014. pp 313–326.

5. Maryam Younessi-Sinaki, Edgar A. Matida, Feridun Hamdullahpur Kinetic model of homogeneous thermal decomposition of methane and ethane // International journal of hydrogen energy. № 34 (2009). P. 3710–3716.

6. Cho Young-Gil, Choi Kyong-Hoon, Kim Young-Rok, Lee Sung-Han Kinetic investigation of oxidative Methane pyrolysis at high CH₄/O₂ ratio in a quartz flow microreactor below 1073 K // Bull. Korean Chem. Soc. 2008, Vol. 29, #8, P. 1609.

7. Jasinski M, Dors M, Mizeraczyk J. Production of hydrogen via methane reforming using atmospheric pressure microwave plasma // J Power Sources 181. 2008. P. 41–45.

8. Lee D.H., Kim K.T., Song Y.H., Kang W.S., Jo S. Mapping plasma chemistry in hydrocarbon fuel processing processes // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2013. Volume 33. P. 249–269

9. Стрельцов И.А., Мишаков И.В., Ведягин А.А., Мельгунов М.С. Синтез углеродных наноматериалов из углеводородного сырья на катализаторе Ni/SBA-15 // Химия в интересах устойчивого развития. № 22. 2014. С. 187–194.

10. Курбаков С. Д. Углеродные фазы, образующиеся при пиролизе газообразных углеводородов в реакционном объеме аппарата кипящего слоя // Неорганические материалы. – 2009. - том 45, № 1. - С. 26-37

11. Скачков В.А. Научно-технические основы формирования функциональных свойств композиционных материалов на основе углерода. дис. ... докт. техн. наук. 05.16.06 / Скачков Виктор Алексеевич. – Запорожье, 2018. – 392 с.

12. Пат. 86131 Україна, МПК (2013.01) B01J 8/18(2006.01), B01J 12/00. Реактор для высокотемпературних процесів / В.О. Богомолів, Б.І. Бондаренко,

О.П. Кожан, К.В. Сімейко; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № u201309320; заявл. 25.07.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. №23. – 7 с.

13. Пат. 83147 Україна, МПК C10G 9/32 (2006.01). Реактор для піролізу газоподібних вуглеводнів / В.О. Богомолов, Б.І. Бондаренко, О.П. Кожан, К.В. Сімейко; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № u201303318; заявл. 18.03.2013. опубл. 27.08.2013, Бюл. №16. – 7 с.

14. Богомолов В.А. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдоожиженном слое / В.А. Богомолов, А.П. Кожан, Б.И. Бондаренко, А.И. Ховавко, К.В. Семейко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – № 5. – С. 36–40.

15. Семейко К.В. Использование электротермического псевдоожиженного слоя в качестве внешнего нагревательного элемента реактора // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. – № 1. – С. 58 – 64.

16. Сімейко К.В. Теплові характеристики реактору для одержання капсульованого піровуглецем кварцево-

го піску при проходженні процесу піролізу метану / К.В. Сімейко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2013. – № 4. – С. 119–123.

17. Семейко К.В. Исследование процесса осаждения твердого углерода при пиролизе углеводородных газов / К.В. Семейко, В.К. Безуглый, А.П. Кожан, Б.И. Бондаренко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. – № 2. – С. 18 – 24.

18. Пат. 117157 Україна, МПК B01J 8/18(2006.01), B01J 8/42(2006.01), B01J 19/14(2006.01), C01B 33/021(2006.01), C01B33/021(2006.01), C30B25/10(2006.01), C30B 28/14(2006.01), C30B 31/12(2006.01). Реактор для високотемпературних процесів у псевдозрідженому шарі / К.В. Сімейко, Б.І. Бондаренко, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № a201506499; заявл. 01.07.2015; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. – 8 с.

RESEARCH THERMAL CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF PYROLYSIS OF METHANE IN THE ELECTROTHERMAL FLUIDISED BED

Simeiko K.V.

The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine; 39, Degtyarivska Str., 03113, Kyiv, Ukraine, e-mail: k_simeyko@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.12>

The main products of high-temperature pyrolysis of methane are carbon and hydrogen. Due to their unique physical and chemical properties, pyrocarbon and pyrographite can be used in various industries and energy. Hydrogen is an energy-efficient and environmentally friendly energy carrier. Despite the large number of research works on methane pyrolysis, carrying out of this process in the electrothermal fluidized bed (ETFB) is not studied enough.

The purpose of the study is to determine the thermophysical characteristics of the process of methane pyrolysis (the main products of the reaction are hydrogen and pyrocarbon) in reactors with different types of ETFB.

The temperature of the complete disposition of methane to carbon and hydrogen is 800 K. This value is based on the thermodynamic calculations.

A laboratory and a pilot plant with a different type of ETFB have been created for this process.

Experimental studies of the process of methane pyrolysis had been carried out on these plants and experimental data were compared with the calculations.

The method which allows to determine the amount of precipitated carbon has been developed. It is based on the gas analysis data. Nusselt's criterion for different types of reactors with ETFB has been calculated.

It was showed that electrothermal heating of a fluidized bed of conductive particles is much more efficient than the external electric heating of a fluidized bed. This result is based on previous researches. It is explained by the direct influence of the plasma of microcircuits and by advantages of heat generation directly in the middle of the fluidized bed.

Taking into account the obtained results and the specifics of the application of the pyrocarbon coating on dielectric materials, a scheme of a reactor with ETFB, which allows to use both external heating and classical ETFB at the same time, has been developed.

References 18, figures 2, tables 3.

Key words: methane, pyrolysis, electrothermal fluidized bed, hydrogen, pyrocarbon.

1. *Tesner P.A.* Obrazovaniye ugleroda iz uglevodorodov gazovoy fazy [The formation of carbon from hydrocarbon gas phase]. M.: Khimiya [Chemistry], 1972. 321 p. (Rus.)

2. *Stepanov Yu.B., Berkutov N.A., Kruglov V.N.* Obrazovaniye i udaleniye otlozheniy pirougleroda (grafita) v koksovykh pechakh [Formation and removal of pyrocarbon (graphite) deposits in coke ovens]. Koks i khimiya [Coke and chemistry]. 2001. № 8. p. 18–26 (Rus.)

3. *Simeiko K.V.* Issledovaniye kharakteristik i svoystv pirouglerodnykh pokrytiy [Research of characteristics and properties of pyrocarbon coatings]. – Jenergotekhnologii i resursosberezheniye [Energy technologies and resource]. 2018. № 1. p. 37 - 43 (Rus.)

4. *Miroslaw Dors, Helena Nowakowska, Mariusz Jasiński, Jerzy Mizeraczyk* Chemical Kinetics of Methane Pyrolysis in Microwave Plasma at Atmospheric Pressure // Plasma Chemistry and Plasma Processing. Volume 34, Issue 2, 2014, p. 313–326.

5. *Maryam Younessi-Sinaki, Edgar A. Matida, Feridun Hamdullahpur* Kinetic model of homogeneous thermal decomposition of methane and ethane // International journal of hydrogen energy. № 34 (2009). P. 3710–3716.

6. *Cho Young-Gil, Choi Kyong-Hoon, Kim Young-Rok, Lee Sung-Han* Kinetic investigation of oxidative Methane pyrolysis at high CH₄/O₂ ratio in a quartz flow microreactor below 1073 K // Bull. Korean Chem. Soc. 2008, Vol. 29, #8, P. 1609.

7. *Jasinski M, Dors M, Mizeraczyk J.* Production of hydrogen via methane reforming using atmospheric pressure microwave plasma // J Power Sources 181. 2008. P. 41–45.

8. *Lee D.H., Kim K.T., Song Y.H., Kang W.S., Jo S.* Mapping plasma chemistry in hydrocarbon fuel processing processes // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2013. Volume 33. P. 249–269

9. *Strel'tsov I.A., Mishakov I.V., Vedyagin A.A., Mel'gunov M.S.* Sintez uglerodnykh nanomaterialov iz uglevodorodnogo syr'ya na katalizatore Ni/SBA-15 [Synthesis of carbon nanomaterials from hydrocarbon feedstock on a Ni / SBA-15 catalyst]. – Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya [Chemistry for Sustainable Development]. № 22. 2014. P. 187–194. (Rus.)

10. *Kurbakov S.D.* Uglerodnyye fazy, obrazuyushchiyesya pri pirolize gazoobraznykh uglevodorodov v reaktionnom ob'yeme apparata kipyashchego sloya [Carbon phases formed during the pyrolysis of gaseous hydrocarbons in the reaction space of a fluidized bed apparatus]. Neorganicheskiye materialy [Inorganic materials]. - 2009. vol. 45, № 1. p. 26-37 (Rus.)

11. *Skachkov V.A.* Nauchno-tehnicheskie osnovy formirovaniya funktsional'nykh svoystv kompozitsionnykh materialov na osnove ugleroda [Scientific and technical basis for the formation of the functional properties of composite materials based on carbon] dissertation of the doctor of technical sciences. Zaporozh'e. 2018. 392 p. (Rus.)

12. *Pat. 86131 Ukraine, B01J 8/18(2006.01), B01J 12/00.* Reaktor dlja vysokotemperaturnykh procesiv [Reactor for high temperature processes] / V.O. Bogomolov O.P.

Kozhan, B.I. Bondarenko, K.V. Simeiko; Applicant and patent holder: Gas institute of National academy of science of Ukraine. № u201309320; applic. date: 25.07.2013; publ. date: 10.12.2013. Bull № 23 (Ukr.)

13. *Pat. 83147 Ukrayina*, C10G 9/32 (2006.01). Reaktor dlya pirolizu hazopodibnykh vuhlevodniv [Reactor for pyrolysis of gaseous hydrocarbons] / V.O. Bohomolov, B.I. Bondarenko, O.P. Kozhan, K.V. Simeiko; Applicant and patent holder: Gas institute of National academy of science of Ukraine. № u201303318; applic. date: 18.03.2013; publ. date: 27.08.2013. Bull № 16 (Ukr.)

14. *Bogomolov V.O. Kozhan A.P., Bondarenko B.I., Khovavko O.I., Simeiko K.V.* Kapsulirovanie kvarcevoogo peska pirouglerodom v jelektrotermicheskom psevdoozhizhenom sloe [Research of the process of quartz sand encapsulation by pyrolytic carbon]. *Jenergotehnologii i resursozberezhenie* [Energy technologies and resource]. 2013, № 5. p. 36–40 (Rus.)

15. *Simeiko K.V.* Ispolzovanie elektrotermicheskogo psevdoozhizhenogo sloya v kachestve vneshnego nagrevatel'nogo elementa reaktora [Efficiency of electrothermal fluidized bed applying as the outer heating element of reactor]. *Jenergotehnologii i resursozberezhenie* [Energy technologies and resource]. 2015, № 1. p. 58 – 64 (Rus.)

16. *Simeiko K.V.* Teplovi harakteristiki reaktoru dlya oderzhannya kapsulovanogo pirovugletsem kvartsevoogo pIsku pri prohodzhenni protsesu pIrolizu metanu [Thermal characteristics of the reactor for pyrocarbon encapsulated quartz sand while passing the pyrolysis of methane]. *Visnik SumDU. Seriya Tehnichni nauki* [Sumy State University. Series Technical Sciences.], 2013. № 4. p. 119 – 123 (Ukr.)

17. *Simeiko K.V., Bezuglyiy V.K., Kozhan A.P., Bondarenko B.I.* Issledovanie protsessa osazhdeniya tverdogo ugleroda pri pirolize uglevodorodnyih gazov [Research of the process of solid carbon deposition in the course of pyrolysis of hydrocarbon gases]. *Jenergotehnologii i resursozberezhenie* [Energy technologies and resource]. 2015, № 2. p. 18 – 24 (Rus.)

18. *Pat. 117157 Ukraine*, B01J 8/18(2006.01), B01J 8/42(2006.01), B01J19/14(2006.01), C01B33/021(2006.01), C01B 33/021(2006.01), C30B 25/10(2006.01), C30B 28/14(2006.01), C30B 31/12(2006.01). Reaktor dlja visokotemperaturnih procesiv u psevdoozhizhenomu shari [The reactor for high temperature processes in fluidized bed] / K.V. Simeiko, B.I. Bondarenko, O.P. Kozhan, V.M. Dmitriev; Applicant and patent holder: Gas institute of National academy of science of Ukraine. № a201506499; applic. date: 01.07.2015; publ. date: 26.06.2017, Bull № 12. (Ukr.)

Отримано 11.10.2018

Received 11.10.2018

**ТЕПЛО- І МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ,
ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУШІННЯ**

- 1. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я.**
Современные способы пленочного охлаждения: влияние ускорения потока. №1, С.5.
- 2. Фіалко Н.М., Піоро І.Л., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О.**
CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. №1, С.12.
- 3. Ковецкая Ю.Ю.**
Эффект числа Прандтля на теплообмен в круглом пористом микроканале. №1, С.21.
- 4. Ковецька М.М.**
Особенности кризиса теплообмена на обогреваемой поверхности при кипении наножидкости. №1, С.27.
- 5. Тертышный И.Н., Парафейник В.П.**
Возможность совершенствования турбокомпрессорных агрегатов газовой промышленности по результатам анализа эффективности их рабочего процесса. №1, С.36.
- 6. Демченко В.Г, Фалько В.Ю., Гронь С.С.**
Мобільні акумулятори для дискретних систем теплоохолодження. Частина 1. №2, С.20
- 7. Фіалко Н.М., Дінжос Р.В., Навродська Р.О., Меранова Н.О., Шеренковський Ю.В.**
Закономірності кристалізації полімерних мікрокомпозиційних матеріалів при різних методах їх отримання. №2, С.5.
- 8. Ковецкая Ю.Ю.**
Оценка длины проскальзывания при течении жидкости в микроканалах. №2, С.12.
- 9. Халатов А.А., Панченко Н.А., Петляк О.О.**
Плівкове охолодження плоскої поверхні в умовах обертання при подачі охолоджувача в трикутні кратери. №3, С.5
- 10. Фіалко Н.М, Носовський А.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Шарасвський І.Г., Піоро І.Л.**
Особливості течії надкритичної води в умовах змішаної конвекції. №3, С.12.
- 11 Ковецкая Ю.Ю., Скицько А.И., Сорокина Т.В.**
Неустойчивость проскальзывающего потока в пористом криволинейном микроканале. №3, С.20.
- 12. Булій Ю.В., Ободович О.М.**
Підвищення енергоефективності брагоректифікаційних установок і ступеню очистки біоетанолу. №3, С.27.
- 13. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Шарасвський І.Г., Піоро І.Л.**
CFD аналіз тепловіддачі надкритичної води в умовах змішаної конвекції. №4, С.5
- 14. Тимошенко А.В., Дмитренко Н.П., Ковецька М.М.**
Аналіз течії та теплообміну в пограничному шарі рідини з суттєвою залежністю в'язкості від температури. №4, С.13

- 15. Турчина Т.Я., Жукотський Е.К., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.**

Вплив мальтодекстрину як структуруючої добавки на процес сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними наноструктурами. №4, С.19

**КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА,
ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ**

- 16. Басок Б.И., Давыденко Б.В.,Новиков В.Г., Сороковой Р.Я.**
Моделирование солнечного излучения для использования в возобновляемой энергетике и в строительной теплофизике. №1, С.44.
- 17. Билека Б.Д., Гаркуша Л.К.**
Топливная экономичность когенерационно-теплонасосных технологий на базе ГТУ в котельных средней мощности. №1, С.51.
- 18. Новицкая М.П.**
Теплообменный аппарат для утилизации теплоты сточных вод домохозяйства. №1, С.56.
- 19. Гелетуца Г.Г., Желєзна Т.А., Драгєв С.В., Баштовий А.І.**
Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні. №1, С.61.
- 20. Гелетуца Г.Г., Желєзна Т.А., Драгєв С.В., Баштовий А.І.**
Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України. №1, С.68.
- 21. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Пресіч Г. О., Гєдаш Г.О., Шевчук С.І., Мартюк О.В.**
Підвищення екологічної ефективності комплексних теплоутилізаційних систем котельних установок. №2, С.27.
- 22. Сігал О.І., Воробйов Л.Й., Павлюк Н.Ю., Сергієнко Р.В.**
Аналіз енергетичних характеристик компонентів твердих побутових відходів міста з населенням 300 тис. осіб. №2, С.33.
- 23. Гелетуца Г.Г., Желєзна Т.А., Баштовий А.І., Гелетуца Г.І.**
Проблеми та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. №2, С.41.
- 24. Корінчук Д.М.**
Ефективний коефіцієнт теплопровідності біопалив за умов високотемпературного зневоднення. №2, С.49.
- 25. Трибой О.В.**
Оцінка життєвого циклу виробництва теплової енергії з тріски біомаси Salix Viminalis l. в Україні. №2, С.56.
- 26. Басок Б.І., Базєєв Є.Т.**
Технологічні та соціально-економічні інновації для підвищення енергоефективності будівель (Огляд). №3, С.46.
- 27. Желєзна Т.А., Баштовий А.І.**
Аналіз основних тенденцій розвитку біоенергетики в Європейському Союзі. №3, С.70.

28. Зубенко В.І., Епик О.В., Антоненко В.О., Олійник Є.М.
Енергетичні та економічні показники технології швидкого піролізу в абляційному реакторі шнекового типу. №3, С.76.

29. Антоненко В.О., Зубенко В.І., Епик О.В.
Паливні характеристики стебел кукурудзи українського походження. №3, С.85.

30. Фіалко Н. М., Степанова А.И., Шевчук С. И., Сбродова Г.А.
Комплексные методики оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем. №4, С.25

31. Басок Б. І., Давиденко Б.В., Божко І.К., Мороз М.В.
Нестационарный перенос теплоты в горизонтальном грунтовом теплообменнике. №4, С.34

32. Крамар В.Г.
Побудова графіка тривалості теплового навантаження (графіка Росандера) для регіонів України. №4, С.41

33. Долінський А.А., Ободович О.М., Сидоренко В.В.
Світовий та вітчизняний досвід виробництва біоетанолу. №4, С.50

34. Драганов Б.Х., Демченко В.Г., Погорелова Н.Д.
Метод профілювання вихрової спіральної камери. №4, С.58

35. Гелетуца Г.Г., Желзна Т.А., Драгнєв С.В., Баштовий А.І.
Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1. №4, С.62

36. Радченко С.В.
Аналіз використання палива домогосподарствами та непромисловими споживачами. №4, С.75

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

37. Клименко В.Н.
Перспективы применения когенерационных технологий в коммунальной энергетике. №3, С.32.

38. Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Гнедаш Г.О., Шевчук С.І., Дашковська І.Л.
Підвищення ефективності комплексних теплоутилізаційних систем для підігрівання та зволоження дуттьового повітря газоспоживальних котлоагрегатів. №3, С.38.

39. Демченко В.Г., Трубачев А.С., Фалько В.Ю., Гронь С.С.
Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 2. №3, С.57.

ТЕРМОДИНАМІКА ТА ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА

40. Приходько А.А., Алексеенко С.В.
Численное исследование влияния шероховатости поверхности на конвективный теплообмен при обледенении профиля крыла. №2, С.65.

41. Супрун Т.Т.
Моделювання зсувного і беззсувного потоку з періодичною швидкісною нестационарністю. №2, С.72.

42. Берегун В.С., Красильников А.И., Полобюк Т.А.
Анализ влияния фильтрации на чувствительность кумулянтного метода обнаружения акустических сигналов утечки. №2, С.78.

43. Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Разумцева О.В., Проценко Л.Н., Добривечер В.В.
Особенности применения программы IQLab при решении обратной задачи теплопроводности для хромоникелевых цилиндрических термозондов. №3, С.91.

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ВИМІРЮВАНЬ ТА МОНІТОРИНГУ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ

44. Круковский П.Г., Метель М.А., Дейнеко А.И., Складенко Д.И.
Анализ и прогнозирование переноса радиоактивной пыли при эксплуатации нового безопасного конфайнмента ЧАЭС. №4, С.69

45. Сімейко К.В.
Дослідження теплофізичних характеристик процесу піролізу метану в електротермічному псевдозрідженому шарі. №4, С.83

**ВИМОГИ ДО РУКОПИСІВ ЖУРНАЛУ
«ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»**
(назва журналу з 2019 року)

В журналі публікуються результати досліджень за напрямками:

- Тепло- і масообмінні процеси та апарати, теорія та практика сушіння;
- Комунальна та промислова енергетика, відновлювана енергетика, енергоефективність;
- Використання та спалювання палива, теплоенергетичні установки, екологія;
- Термодинаміка та процеси переносу, атомна енергетика;
- Теорія і практика вимірювань та моніторингу в теплоенергетиці.

Приймаються статті українською, російською та англійською мовами.

Стаття повинна бути структурованою та містити підрозділи:

- постановку проблеми в цілому та її зв'язок з актуальними науковими та практичними задачами;
- аналіз останніх досліджень та публікацій, в яких започатковані рішення цієї проблеми;
- виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, якій присвячена дана стаття;
- формулювання цілей статті (постановка задачі);
- виклад основного матеріалу з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження та перспективи подальших завдань по даному напрямку.

До статті повинно додаватися:

- офіційний лист, підписаний керівником організації, в якій виконувалася робота;
- два примірники рукопису статті, виконаної відповідно до вимог, викладених нижче. Один екземпляр рукопису повинен бути підписаний усіма авторами;
- оригінал експертного висновку про можливість опублікування даної роботи у відкритій пресі;
- підписану авторами «Угоду» про передачу авторами прав на публікацію рукопису і подальше розміщення статті в інтернеті (зразок – на сайті <http://www.ihe.nas.gov.ua>);
- повна поштова адреса одного з авторів, контактний телефон та адреса електронної пошти;
- текстовий файл всієї статті і окремо файли малюнків в програмних пакетах, описаних нижче (пересилаються на електронну пошту редакції: shmorgun@nas.gov.ua, shmorgun@itf.kiev.ua).
- російськомовний блок (якщо стаття викладена українською мовою), який включає російською мовою назву статті, прізвища авторів, поштову адресу організації, анотацію статті (структуровану, з кількістю знаків – не менше 1800), ключові слова, кількість рисунків, таблиць, бібліографічних посилань, список використаної літератури).
- україномовний блок, (якщо стаття викладена російською, чи англійською мовами), який включає українською мовою назву статті, прізвища авторів, поштову адресу організації, анотацію статті (структуровану, з кількістю знаків – не менше 1800), ключові слова, кількість рисунків, таблиць, бібліографічних посилань, список використаної літератури).

ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Стаття повинна містити:

- шифр УДК; назва статті; прізвище, ім'я, по батькові авторів;
- повна назва організацій, де працюють автори, їх поштову адресу;
- резюме українською, російською та англійською мовами (до 200-300 знаків), що відображає мету проведених досліджень і основні результати;
- кількість бібліографічних посилань, таблиць, малюнків (наприклад: "Бібл. 9, табл. 1, рис. 3")
- ключові слова;
- список позначень;
- текст статті (українською, російською чи англійською мовами) структурований, з висновками;
- список літературних джерел (не більше 15), в порядку посилань на них у статті;

- блок на латиниці, що включає:

- Назву статті англійською мовою; Прізвище, ім'я, по батькові всіх авторів – транслітерацією;
- Повні найменування і поштові адреси організацій, в яких працюють автори. Назви організацій, приналежність їх до конкретних відомств, поштові адреси, місто і країна подаються англійською мовою без скорочень;
- Реферат англійською мовою (1000...2000 знаків), структурований, що містить мету, завдання, методи досліджень, результати;
- бібліографію у вигляді: References 7, tables 2, figures 5.
- Key words (ключові слова);
- Список літературних джерел на латиниці: той же список, що і в статті, але прізвища авторів – транслітерацією; назва статті – англійською мовою (в квадратних дужках); назви журналів, інших літературних посилань - транслітерацією кирилиці, і далі в квадратних дужках – англійською мовою; вихідні дані позначаються англійською мовою, або - цифровими даними. В кінці кожного посилання (неангломовного видання) в дужках необхідно вказати мову оригіналу статті – (Rus.) або (Ukr.). Назви літературних джерел представляються без скорочень.
- Транслітерація алфавіту латиницею здійснюється відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01. 2010 року № 55 (див. <http://zakon.rada.gov.ua>).

Обсяг статті (з малюнками) повинен не перевищувати 10 сторінок (міжрядковий інтервал – 1,5), кількість авторів не повинно перевищувати 4-х.

ОПИС МАКЕТА СТАТТІ:

Стаття повинна набиратися в текстовому редакторі Microsoft Word 97-2003, редактор формул MathType 5.0 і вище. Формат сторінки – А4, поля зверху, знизу, зліва – 2,5 см., Праворуч – 1,5 стор.

Основний текст: міжрядковий інтервал – 1,5. Шрифт – Times New Roman 11pt, вирівнювання по ширині, автоматична розстановка переносів, перший ряд – відступ 1,25 см. Назва статті – шрифт 12pt, жирний, дрібними літерами, розміщення по центру. Стаття оформляється без колонтитулів і нумерації сторінок. При написанні чисел дробову частину від цілої відокремлювати комою, а не крапкою.

Всі позначення виносяться з тексту і представляються єдиним списком перед викладом матеріалу статті. Позначення розташовуються в алфавітному порядку, в стовпчик, спо-

чатку латинські, потім грецькі, російські, далі індекси - верхні і нижні. При використанні в тексті скорочених назв необхідно також дати їх розшифровку в кінці списку позначень.

Приклад: a – коефіцієнт температуропровідності;
 Re – число Рейнольдса;
 T – температура;
 t – час;
 α – коефіцієнт тепловіддачі;
 ЗСОБ – замкнута система опалення та вентиляції.

Латинські позначення величин та індексів повинні друкуватися курсивом, (крім const , exp , $\ln$, max , min , Bi , Fo , M , Nu , Pr , Re , St , $\sin$, $\cos$, $^{\circ}\text{C}$, K , C_2H_4 , CO_2 , O_2 ...), грецькі та російські – прямим шрифтом (в тексті, а також в формулах, на рисунках). Слід чітко розрізняти написання дефіса (-) і тире (–).

Формули: математичні формули представляються у вигляді окремих об'єктів в редакторі формул MathType. Шрифт – Times New Roman 11pt, вирівнювання по центру, нумерація – в круглих дужках, праворуч. Для редактора формул використовуються такі параметри: грецькі символи і букви – шрифт Symbol. Решта – Times New Roman. Розміри: звичайний – 11pt, великий символ – 14pt, великий індекс – 8pt. Латинські літери і символи повинні представлятися в стилі «Математичний», кириличні – в стилі «Текст». Не допускається подання формул і їх нумерації в вигляді таблиці. Символи в формулах і тексті статті повинні мати однакові зображення.

Рисунки: рисунки (до 5) представляються в спеціалізованих графічних програмних пакетах Adobe Photoshop, Corel Photo-Paint, Corel Draw з розширенням файлів tif, grg, pch, bmp. з роздільністю 300 dpi без підписів під рисунками і вставляються в текст як "малюнок", а не «полотно». Шрифт тексту на малюнках – Times New Roman 11pt. Невеликі малюнки рекомендується розміщувати з обтіканням текстом на 3 мм. Якщо малюнок вставлений, то необхідно відзначити опцію «Переміщати з текстом» і «Встановити прив'язку». Використання альбомної орієнтації не допускається. Фотографії представляти лише за крайньої необхідності.

Література: Список літературних джерел (не більше 15) нумерується в порядку згадування в тексті. Шрифт Times New Roman 10pt, прізвища авторів – курсивом. Скорочення назв цитованих джерел не допускається.

Статті, оформлені з недотриманням Вимог будуть повертатися авторам. Датою надходження буде вважатися дата повторного надходження статті, оформленої відповідно до вищевикладених Вимог. Більш детальну інформацію можна отримати в редакції журналу, т. (044) 456-48-67, (095) 277-33-73, поштою: shmorgun@nas.gov.ua, shmorgun@ittf.kiev.ua, або на сайті <http://www.ihe.nas.gov.ua>.

Поштова адреса редакції: вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна.

ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

УДК 621.577

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ ГОСПОДАРСТВІ УКРАЇНИ

Долінський А.А.¹, академік НАН України, Фіалко Н.М.¹, член-кореспондент НАН України, Навродська Р.А.¹, канд. техн. наук, Гнедой Н.В.², канд. техн. наук.

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

² Інститут проблем енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03680, Україна

Резюме (українською, російською та англійською мовами).

Ключові слова: енергетичне господарство України, вторинні енергоресурси, перспективи використання.

Бібліографія 4, рис. 5, табл. 1.

Список позначень.

ТЕКСТ СТАТТІ

(Текст оформлюється у відповідності до вищевикладеного макету статті)

ЛІТЕРАТУРА

1. Статистичний щорічник України за 2010 рік. – К.: Видавництво Консультант, 2011. – 551 с.
2. Фіалко Н.М., Зимин Л.Б. Анализ эффективности теплонасосных систем утилизации теплоты // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 77–85.

CONDITION AND PROSPECTS OF USE OF SECONDARY POWER RESOURCES IN THE POWER ECONOMY OF UKRAINE

Dolinskiy A.A.¹, Fialko N.M.¹, Navrodska R.A.¹, Gnedoy N.M.²

¹ Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

² Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Antonovycha, 172, Kyiv, 03057, Ukraine

The data about the structure and volume of waste energy output in the power sector of Ukraine are represented. Principles of changes of these volumes in concordance with the trends of the economy development are analyzed. The features of use of the different types of waste energy are considered. The prognostic assessment results of output volumes and the using levels of waste energy in the near future are given. (Об'єм реферата, структурованого, повинен містити не менш як 1800 знаків). References 4, tables 1, figures 5.

Key words: power economy, secondary power resources, waste energy.

1. [Statistical annual of Ukraine for 2010], Kyiv, Konsultant [Consultant]. 2011. 551p. (Ukr.)
2. Fialko N.M., Zimin L.B. [Analysis of the efficiency of heat pump system for the utilization of sewage heat for the heat supply of social objects], Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2008. V. 30. № 1. P. 77–85. (Rus.)