

СОДЕРЖАНИЕ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ
НАН УКРАИНЫ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ
ЖУРНАЛ

Выходит 6 раз в год

Основан в 1979 г.

Том 38, № 4, 2016

Главный редактор – Долинский А.А.

Редакционная коллегия:

Авраменко А.А.

Бабак В.П.

Базеев Е.Т.

Басок Б.И. – зам. главного редактора

Буляндра А.Ф.

Гелетуха Г.Г.

Дубовской С.В.

Клименко В.Н.

Круковский П.Г.

Письменный Е.Н.

Пятничко А.И.

Сигал А.И.

Снежкин Ю.Ф.

Фиалко Н.М.

Халатов А.А.

Чайка А.И.

Шморгун В.В. – ответственный секретарь

Редакционный совет:

Алексеенко С.В. (Россия)

Бончев Г. (Болгария)

Вацлавик Ю. (Польша)

Коверда В.П. (Россия)

Коновалов В.И. (Россия)

Люриг Х. (Германия)

Маджамдар А. (Канада)

Матеи И. (Румыния)

Мизута И. (Япония)

Минг-Шан-Жу (Китай)

Накоряков В.Е. (Россия)

Сайред Н. (Великобритания)

Тоттен Дж. Е. (США)

К 85-летию со дня рождения академика НАН Украины
А.А. Долинского.....3

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Фиалко 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.....5

Воскобійник В.А., Воскобійник А.В.

Поле швидкості та вихровий рух усередині
напівциліндричної траншеї.....13

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Долинский А.А., Ободович А.Н., Фищенко А.Н.,
Сидоренко В.В.

Сравнение эффективности аэрации культуральной
среды в массообменных установках с дискретно-
импульсным вводом энергии при культивировании
хлебопекарских дрожжей.....23

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СУШКИ

Бошкова И.Л., Волгушева Н.В.

Циклическая микроволновая сушка плотного слоя
зерновых материалов.....31

КОММУНАЛЬНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Степанова А.И.

Анализ работоспособности установки с
комбинированной теплоутилизационной системой для
подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата.....38

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Авраменко А.А., Ковецкая М.М.,
Кравчук А.В., Ковецкая Ю.Ю.

Перспективные исследования инновационных
технологий ядерных энергетических установок.....47

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Баштовий А.І.

Аналіз моделей функціонування сектору
централізованого тепlopостачання країн Європейського
Союзу. Частина 1.....63

Железна Т.А., Баштовий А.І., Гелетуха Г.Г.

Аналіз можливості отримання деревного палива з
додаткових джерел в Україні.....71

Басок Б.И., Базеев Е.Т.

Внутренняя энергия земли: новая гипотеза (обзор).....78

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
APPLIED JOURNAL

Published bimonthly
Founded in 1979

Volume 38, № 4, 2016

Editor in Chief – A. DOLINSKY

Editorial Board Members:

A. Avramenko
V. Babak
E. Bazeev
B. Basok – Associated Editor
A. Bulyandra
G. Geletykh
S. Dubovskoi
V. Klimenko
P. Kruckovsky
Ye. Pysmennyy
A. Pyatnichko
A. Sigal
Yu. Snezhkin
N. Fialko
A. Khalatov
A. Chaika
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

S. Alekseenko (Russia)
G. Bonchev (Bulgaria)
J. Wazlawik (Poland)
V. Coverda (Russia)
V. Konovalov (Russia)
H. Lurig (Germany)
A. Mujumdar (Canada)
J. Matei (Romania)
Y. Mizuta (Japan)
Ming-Shan-Zhu (China)
V. Nakoryakov (Russia)
N. Syred (United Kingdom)
G. Totten (USA)

CONTENTS

To the 85th birthday academician of NAS of Ukraine
A.A.Dolinskiy.....3

HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES

N.M. Fialko, I.L. Pioro, N.V. Maison, N.O. Meranova,
I.G. Sharaevsky

Effect of mass flux on flow characteristic and heat transfer
in bare tubes at supercritical parameters.....5

V.A. Voskoboinick, A.V. Voskoboinick

Velocity field and vortex motion inside the half-
cylindrical trench.....13

HEAT AND MASS EXCHANGE APPARATUS

A. Dolinskiy, A. Obodovich , A. Fischenko,
V. Sidorenko

Comparison of effectiveness of aeration of the culture
medium in the mass transfer setups with discrete-pulsed
input of energy during cultivation of bakery yeast.....23

THEORY AND PRACTICE OF DRYING

I.L. Boshkova, N.V. Volgusheva

Cyclic microwave drying dense layer of grain materials.....31

DISTRICT AND INDUSTRIAL HEAT POWER

A. Stepanova

Analysis of the application combined heat recovery
systems for water heating and blast air of the boiler unit....38

NUCLEAR POWER

A.A. Avramenko, M.M. Kovetskaya,
A.V. Kravchuk, Yu.Yu. Kovetskaya

Perspective researches of innovative technologies of
nuclear power plants.....47

RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

G.G. Geletukha, T.A. Zheliezna, A.I. Bashtovy

Analysis of operation models in the district heating sector of
EU countries. Part 1.....63

T.A. Zheliezna, A.I. Bashtovy, G.G. Geletukha

Analysis of possibility to obtain wood fuel from additional
sources in Ukraine.....71

B.I. Basok, E.T. Bazyev

Internal energy of the earth: a new hypothesis (overview)..78

ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА

К 85-летию со дня рождения Анатолия Андреевича Долинского

– известного ученого-теплоэнергетика, специалиста в области, тепломассообмена и энергосберегающих теплотехнологий, доктора технических наук, профессора, академика Национальной академии наук Украины



21 июля этого года исполнилось 85 лет со дня рождения Анатолия Андреевича Долинского – доктора технических наук, профессора, академика Национальной академии наук Украины, почетного директора Института технической теплофизики НАН Украины, главного редактора Международного научно-прикладного журнала «Промышленная теплотехника».

А.А.Долинский родился 21.07.1931 г. в с. Орлянка Запорожской области. В 1949 г. поступил на теплоэнергетический факультет Киевского политехнического института. После окончания, с 1954 по 1956 годы, работал старшим инженером-технологом на турбинном заводе “Пяргале” в г. Каунасе, Литва. С 1957 г. работает в Институте технической теплофизики НАН Украины на должностях: инженера, главного механика, младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, заведующего научным отделом. В 1962 г. защитил кандидатскую, в 1972 г. – докторскую диссертацию. В 1978 г. избран членом-корреспондентом НАН Украины, в 1988 г. – академиком НАН Украины.

С 1985 г. по 2004 г. А.А.Долинский избирался заместителем академика-секретаря Отделения физико-технических проблем энергетики НАН Украины. С 1982 г. по 2015 г. А.А.Долинский – директор Института технической теплофизики НАН Украины, с 2015 г. – почетный директор данного института.

Возглавляя на протяжении более трех десятилетий институт А.А.Долинский адаптировал структуру и научную тематику института к новым рыночным условиям, сохранив при этом традиционные научные школы и коллективы. Большое внимание он уделил переводу научных исследований на новый современный уровень с привлечением к поисковым работам талантливой молодежи, созданию для них надлежащих бытовых условий.

А.А.Долинский предложил и научно обосновал принципиально новый метод интенсификации процессов тепломассообмена при дискретно-импульсном вводе энергии (ДИВЭ), внес весомый вклад в развитие теории процессов переноса теплоты и вещества в дисперсных газожидкостных средах. Им создана технология и технологические аппараты для испарительно-сушильного оборудования при производстве термолабильных растворов антибиотиков, пищевых продуктов.

Академиком А.А.Долинским опубликовано более 600 научных трудов, в том числе 20 монографий и более 120 изобретений и патентов. Среди его учеников – десятки докторов и кандидатов наук. Он – Почетный профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

На протяжении многих лет А.А.Долинский – главный редактор Международных научно-прикладных журналов «Промышленная теплотехника» и «Керамика: наука и жизнь». Он – член редакционных советов ведущих журналов по проблемам тепломассообмена «International Journal of Heat and Mass Transfer», США, «Drying Technology Journal», Канада, «Инженерно-физический журнал», Беларусь.

Исследования, проведенные А.А.Долинским, отмечены Государственными премиями Украины в области науки и техники (1984, 1997, 2004), премией НАН Украины им. Г.Ф.Проскуры (1986), премией НАН Украины им. В.И.Толубинского (1999), премией Президентов Академий наук Украины, Беларуси и Молдовы (2001), премией имени академика А.В.Лыкова НАН Беларуси (2005). А.А.Долинскому присуждено звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины» (1991), «Почетный энергетик Украины» (2006), «Почетный работник жилищно-коммунального хозяйства Украины» (2007). Он награжден наградами: «За научные достижения» НАН Украины, «Знак Почета» Национального агентства Украины по вопросам обеспечения эффективного использования энергетических ресурсов (2007), «Золотой Знак Меркурия» Торгово-промышленной палаты Украины (2007), нагрудным Знаком «Знак Почета» Киевского городского Головы (2001), «Заслуженный энергетик Содружества Независимых Государств» (2000) и др.

А.А.Долинский награжден орденами: «Дружбы народов» (1986), «За трудовые достижения» IV степени (2000), «За заслуги» III степени (2002), Почетной грамотой Верховного Совета Украины.

Сердечно поздравляем Анатолия Андреевича с 85-летием, желаем ему крепкого здоровья, новых достижений и творческих свершений.

**Коллектив Института технической теплофизики НАН Украины,
Редакционная коллегия журнала «Промышленная теплотехника»**

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ГЛАДКИХ ТРУБАХ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Фиалко Н.М.^{1,3}, член-корреспондент НАН Украины, **Пиоро И.Л.²,** докт. техн. наук, **Майсон Н.В.¹,** **Меранова Н.О.¹,** канд. техн. наук, **Шараевский И.Г.³,** докт. техн. наук

¹*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина*

²*Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada*

³*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина*

Аналізуються дані комп'ютерного моделювання зі встановленням закономірностей впливу масової швидкості потоку на характеристики течії та теплообміну в гладких трубах при надкритичних параметрах. Представлено результати досліджень, що відповідають зміні масової швидкості від 1002 кг/(м²с) до 1400 кг/(м²с).

Анализируются данные компьютерного моделирования по установлению закономерностей влияния массовой скорости потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Представлены результаты исследований, отвечающих изменению массовой скорости от 1002 кг/(м²с) до 1400 кг/(м²с).

Data of computer modeling on the ascertainment of developments of mass flux effect on the characteristics flow and heat transfer in bare tubes at supercritical parameters are analyzed. This research results correspond to mass flux variable from 1002 kg/(m²s) to 1400 kg/(m²s).

Библ. 11, рис. 6.

Ключевые слова: сверхкритическая вода, течение, теплообмен, массовая скорость, CFD моделирование.

G – массовая скорость, кг/(м²с);

P – давление на входе в трубу, МПа;

q – плотность теплового потока на стенке трубы, Вт/м²;

r – радиальная координата, м;

T – температура, °C;

U_z – осевая компонента скорости, м/с;

z – осевая координата, м;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К);

ρ – плотность, кг/м³.

Нижние индексы:

b – среднемассовый (bulk fluid);

dht – ухудшенный теплообмен (deteriorated heat transfer);

pc – псевдокритический (pseudocritical);

w – стенка (wall).

Сокращения:

CFD – Computational Fluid Dynamics;

АЭС – атомная электростанция.

сверхкритической воды в вертикальных гладких трубах при высоких массовых скоростях жидкости $G > 1000$ кг/(м²с). Особое внимание уделяется изучению влияния величины данной скорости потока на гидродинамические и тепловые характеристики сверхкритической воды.

Постановка задачи и методика исследований

Особенности постановки задачи смешанной

теплоотдачи, отвечающей анализируемой физической ситуации, рассмотрены в [10]. Здесь же приводятся численные значения основных величин, входящих в условия однозначности, и характеристики расчетной сетки, применяемой при численной реализации данной задачи с использованием программного обеспечения FLUENT.

В ходе исследований величина массовой скорости изменялась от 1002 кг/(м²с) до 1400 кг/(м²с). При этом значения плотности подводимого теплового потока на поверхности стенки трубы и давления воды на входе в трубу оставались постоянными $q = 681 \text{ кВт}/\text{м}^2$, $P = 23,9 \text{ МПа}$.

Результаты исследований и их анализ

В работе для рассматриваемых вариантов расчетов, отвечающих значениям $G = 1002$, 1200 и 1400 кг/(м²с), по зависимости [11] были определены величины минимального теплового потока q_{dh} , при превышении которого возникает режим ухудшенного теплообмена. Для указанных значений G эти величины составили 687, 835 и 984 кВт/м², что больше принимаемого в данной работе значения q равного 681 кВт/м². Таким образом, согласно выполненным оценкам, все анализируемые ситуации характеризуются отсутствием режима ухудшенного теплообмена.

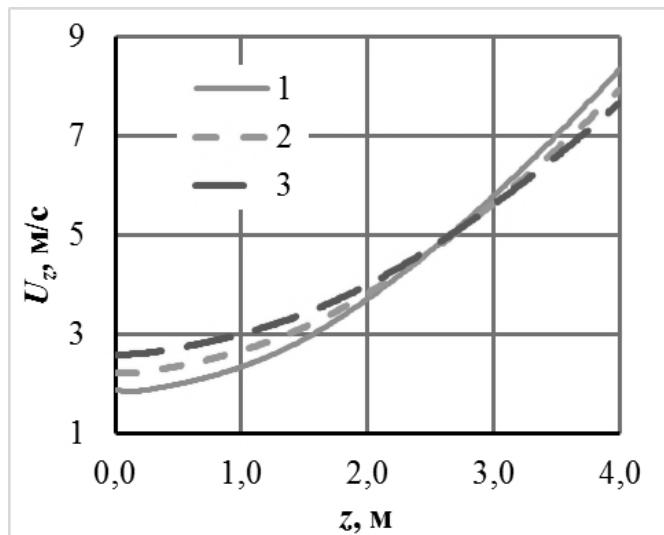


Рис. 1. Распределение осевой компоненты скорости вдоль оси трубы при варьировании величины массовой скорости воды G :
1 – $G = 1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 2 – $G = 1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$;
3 – $G = 1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

На рисунках 1-6 приведены характерные результаты выполненных исследований в условиях варьирования массовой скорости сверхкритической воды. При анализе полученных данных рассмотрим вначале особенности влияния этой скорости на соответствующие особенности картины течения и затем для теплообмена.

Рисунки 1 и 2 иллюстрируют результаты компьютерного моделирования, касающиеся закономерностей течения сверхкритической воды при варьировании величины массовой скорости G .

Как следует из приведенных данных, влияние G на характеристики течения сверхкритической воды оказываются неоднозначными. Так, на значительном участке трубы, прилежащем к ее входу ($z \approx 2,6 \text{ м}$), при увеличении G скорость воды на оси трубы повышается. Однако при $z > 2,6 \text{ м}$ наблюдается обратная картина. Здесь с ростом массовой скорости воды G осевая скорость U_z , напротив, падает (рис. 1).

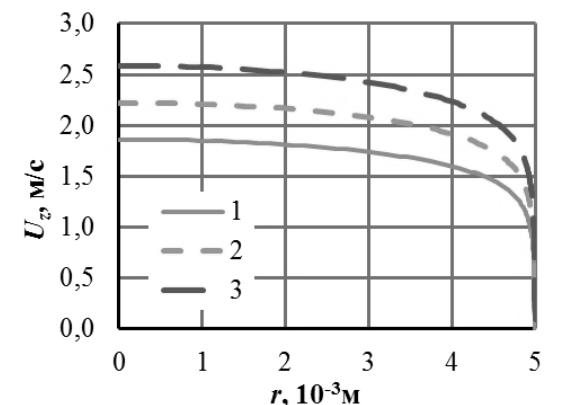
Описанный характер влияния массовой скорости связан со следующими двумя конкурирующими факторами. Во-первых, с тем, что увеличение G должно приводить к повышению скорости потока, как это имеет место в изотермических условиях. И, во-вторых, с тем, что при увеличении массовой скорости сверхкритической воды уровень ее нагрева по длине канала становится ниже и соответственно ее плотность вниз по потоку падает менее существенно (рис. 3). Ввиду этого повышение G , напротив, должно обуславливать понижение скорости потока. Согласно приведенным данным, при $z \leq 2,6 \text{ м}$ доминирующим является первый из указанных факторов, а при $z > 2,6 \text{ м}$ – второй.

Рисунки 4 – 6 иллюстрируют результаты компьютерного моделирования, касающиеся особенностей теплообмена при варьировании массовой скорости G . Как видно из рис. 4, *a*, изменение величины G весьма существенно влияет на значения коэффициента теплоотдачи α . С ростом массовой скорости коэффициент теплоотдачи заметно повышается на всем обогреваемом участке трубы. Так, в центральной части трубы при увеличении G от 1002 кг/(м²с) до 1400 кг/(м²с) значение α повышается в 2,25 раза.

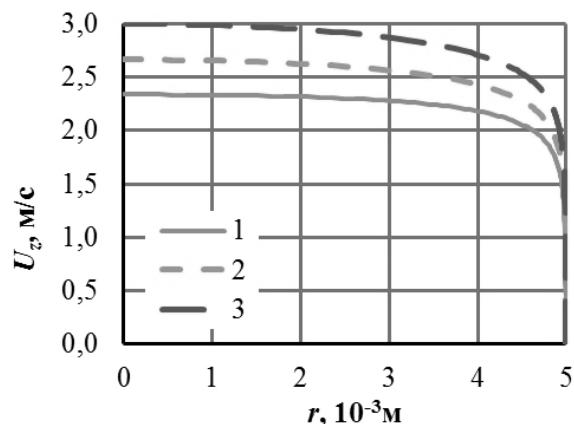
С ростом массовой скорости G несколько изменяется также характер зависимости

$\alpha = f(z)$. Изменение α по длине трубы становится существенно более неравномерным. При этом локальный максимум α в ее центральной части оказывается более ярко выраженным. Такая

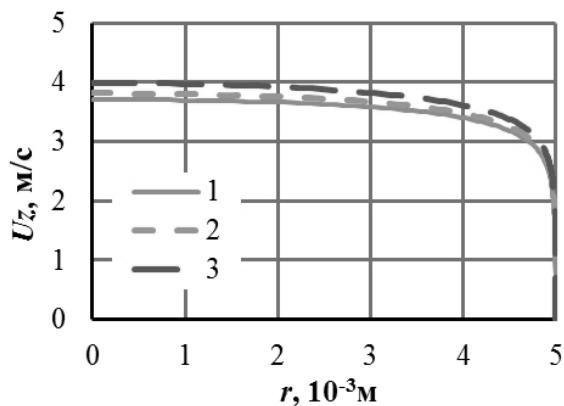
картина влияния массовой скорости на величину коэффициента теплоотдачи, как очевидно, определяется при $q = \text{const}$ особенностями поведения по длине трубы температур T_w и T_b .



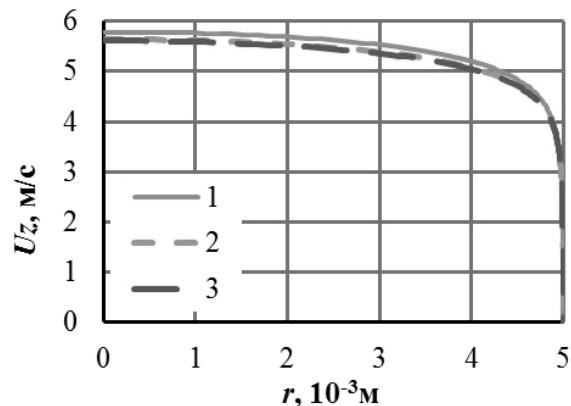
(a)



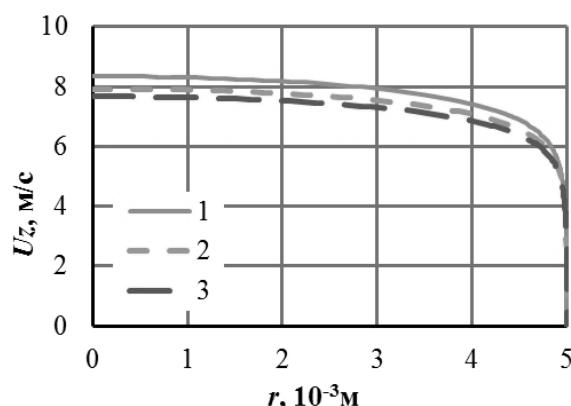
(b)



(c)



(d)



(e)

*Рис. 2. Профили осевой компоненты скорости в поперечном сечении трубы, отвечающие значениям массовой скорости воды $G = 1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ – (1); $G = 1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ – (2); $G = 1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ – (3), на различном удалении z от входа в ее обогреваемый участок:
(a) – $z = 0$; (б) – $z = 1 \text{ м}$; (в) – $z = 2 \text{ м}$; (г) – $z = 3 \text{ м}$; (д) – $z = 4 \text{ м}$.*

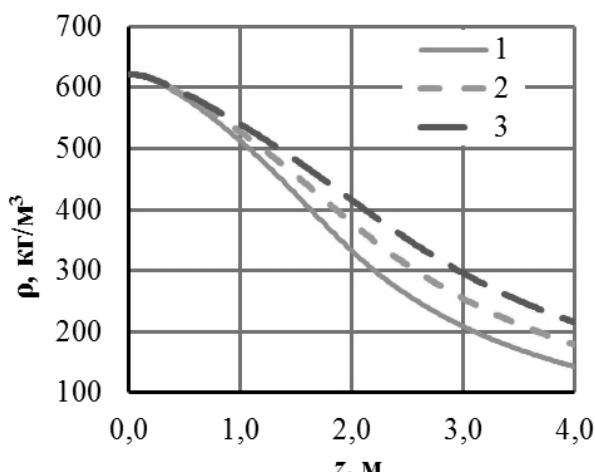
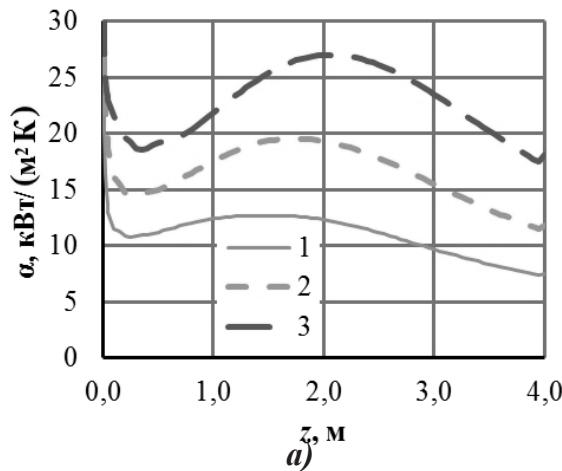
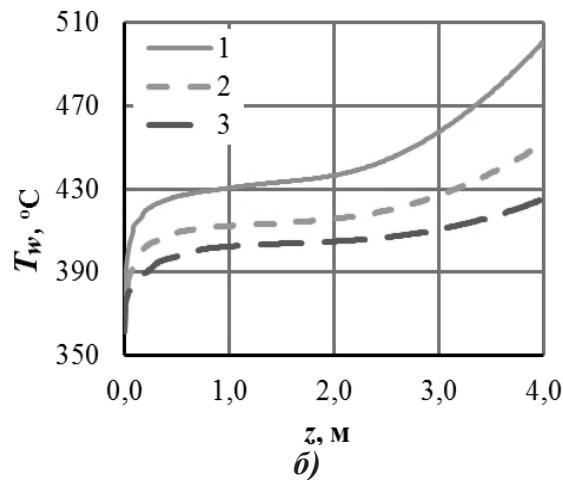


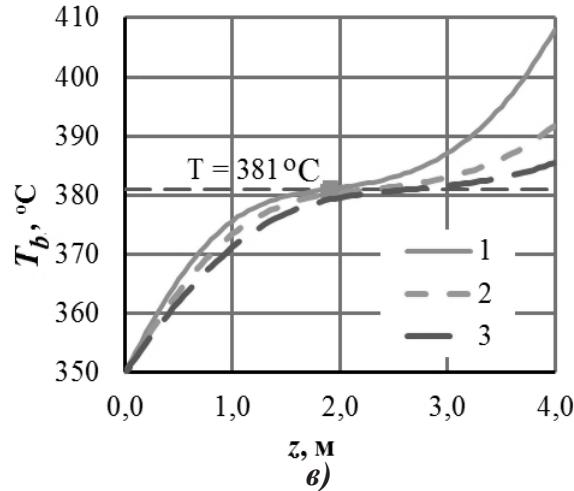
Рис. 3. Изменение плотности воды вдоль оси трубы при различных значениях массовой скорости воды G : 1 – $G = 1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 2 – $G = 1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 3 – $G = 1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.



а)



б)



в)

Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи (а), температуры T_w внутренней поверхности стенки (б) и среднемассовой T_b температуры воды (в) вдоль обогреваемого участка трубы при различных значениях массовой скорости воды G : 1 – $G = 1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 2 – $G = 1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; 3 – $G = 1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

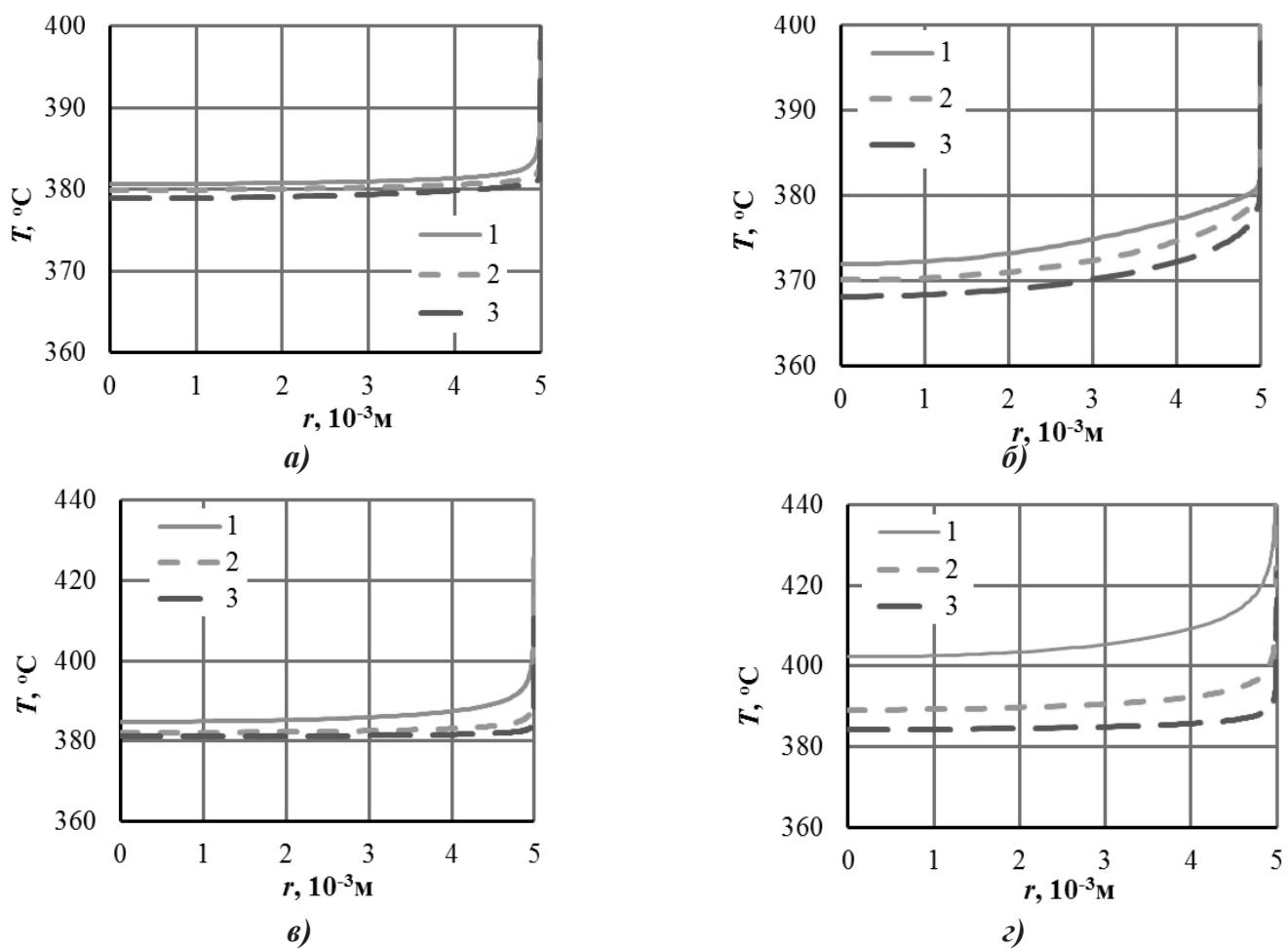


Рис. 5. Профили температуры в поперечном сечении трубы, отвечающие значениям массовой скорости воды 1002 кг/(м²с) – (1); 1200 кг/(м²с) – (2); 1400 кг/(м²с) – (3), на различном удалении z от входа в ее обогреваемый участок:

(а) – $z = 1$ м; (б) – $z = 2$ м; (в) – $z = 3$ м; (г) – $z = 4$ м.

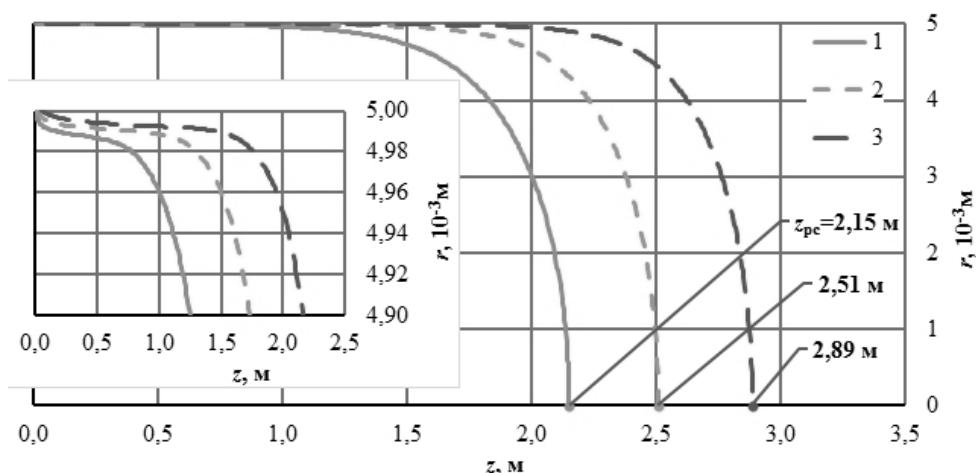


Рис. 6. Конфигурация фронта псевдокритического фазового перехода воды в трубе при различных значениях ее массовой скорости G :

1 – $G = 1002$ кг/(м²с); 2 – $G = 1200$ кг/(м²с); 3 – $G = 1400$ кг/(м²с).

То есть в рамках этого участка перепад температур ΔT падает, что и обуславливает повышение α . Дальнейшее по потоку снижение α связано с повышением ΔT , которое определяется достаточно резким ростом температуры стенки при весьма умеренном повышении среднемассовой температуры жидкости.

Картину движения фронта псевдокритического перехода для различных величин массовой скорости иллюстрирует рис. 6. Согласно приведенным данным фронт движется от стенки к оси трубы тем быстрее, чем меньше массовая скорость воды. Он достигает оси трубы при $z = 2,15$ м, $2,51$ м и $2,89$ м соответственно для $G = 1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, $1200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и $1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

Выводы

На основе CFD прогнозирования с использованием программного обеспечения FLUENT выявлены закономерности изменения теплогидравлических характеристик сверхкритической воды в вертикальных гладких трубах с нагреваемой длиной 4 м и внутренним диаметром 10 мм при варьировании ее массовой скорости G в диапазоне от $1002 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ до $1400 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ для $P = 23,9 \text{ МПа}$ и $q = 681 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Показано, что влияние массовой скорости на картину течения в трубе является неоднозначным ввиду действия ряда конкурирующих факторов. Ее увеличение приводит на значительном участке трубы, прилежащем к ее входу ($0 < z < 2,6$ м), к повышению скорости сверхкритической воды, а на участке, примыкающем к выходу трубы ($2,6 \leq z < 4,0$ м) – к снижению скорости. Установлено также, что с ростом G имеет место существенное увеличение коэффициента теплоотдачи α (в центральной части трубы до 2,25 раза) при реализации его значительно более неравномерного распределения по длине трубы. Показано, что движение фронта псевдокритического перехода от стенки трубы к ее оси при увеличении массовой скорости сверхкритической воды замедляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов П.Л. Водоохлаждаемые реакторы на воде сверхкритических параметров // Теплоэнергетика. – 2009, № 5. С. 2–5.
2. Жук В.В., Барбашев С.В. Кравченко В.П.

Обеспечение безопасности АЭС с реактором ВВЭР-СКД // Ядерна енергетика та довкілля. – 2015, №1. – С.4 – 10.

3. Kelly J.E. Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation. – Progress in Nuclear Energy. – 2014, Vol. 77. – P. 240 – 246.

4. Глебов А.П., Терентьев М.И. Разработка прототипа реактора SCWR, охлаждаемого водой при сверхкритическом давлении, в рамках программы GIF (МФП-4) // Атомная техника за рубежом. – 2014, № 5. – С. 3–17.

5. Аслолов В.Г., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А. Облик АЭС с легководными энергетическими реакторами следующего поколения // Седьмая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – Москва, 26–27 мая 2010. – М: ОАО "Концерн Росэнергоатом", 2010 – С. 7–14.

6. Семченков Ю.М., Сидоренко В.А. Перспективы развития АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. – 2011, № 5. – С. 2–9.

7. Agranat V., Malin M., Pioro I., Abdulla R., Perminov V.A. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow // Proceedings of ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan. – 2015. – Paper 1163. – 11 p.

8. Van'yukova, G.V., Kuznetsov, Yu.N., Loninov A.Ya., Papandin M.V., Smirnov V.P. and Pioro I.L. Application of CFD Code to Calculations of Heat Transfer in a Fuel Bundle of SCW Pressure Channel Reactor . – Proc. 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSCWR-4), March 8–11, 2009. – Heidelberg, Germany, 2009. – Paper 28. – 9 p.

9. Farah A., Harve, G. and Pioro I. Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications – Proceedings of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-15), Pisa, Italy, May 12-15 2013. – Paper 118. – 13 p.

10. Фиалко 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.12–21.

11. Mokry S., Pioro I.L., Farah A., King K., Gupta S., Peiman, W. and Kirillov P. Development of Supercritical Water Heat-Transfer Correlation for Vertical Bare Tubes// Nuclear Engineering and Design. – 2011, Vol. 241. – P. 1126–1136.

EFFECT OF MASS FLUX ON FLOW CHARACTERISTIC AND HEAT TRANSFER IN BARE TUBES AT SUPERCRITICAL PARAMETERS

**Fialko N.M.^{1,3}, Pioro I.L.², Maison N.V.¹,
Meranova N.O.¹, Sharaevsky I.G.³**

¹Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

²Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

³Institute of safety problem of NPP of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lysogorskaja, 12, Kyiv, 03680, Ukraine

On the basis of CFD of prediction with the use of FLUENT software the regularities of changes

of supercritical water thermal and hydraulic characteristics by varying its mass flux in the range from 1002 kg/m²s up to 1400 kg/m²s for inlet pressure $P = 23,9$ MPa and wall heat flux $q = 681$ kW/m² were revealed. It is shown that the effect of the mass flux on the flow pattern in the tube is ambiguous due to the action of a number of competing factors. The mass flux increase leads to the supercritical water velocity increasing on considerable section of the tube adjacent to its inlet ($0 < z < 2,6$ m), and on the section adjacent to the outlet of the tube ($2,6 \leq z < 4,0$ m) – to the velocity decreasing. The fact that with increasing G significant increasing of α (at the central part of the tube to 2,25 times) has place at realization of its much more irregular distribution along the tube length was also found. It was shown that the pseudocritical transition front movement from the tube wall to its axis slows at increasing the mass flux.

References 11, figures 6.

Key words: Supercritical Water, Computational Fluid Dynamics (CFD), Flow and Heat Transfer, Mass flux.

1. Kirillov P.L. Water-cooled reactors on supercritical water. *Teploenergetika*. – 2009, № 5. P. 2–5. (Rus)
2. Zhuk V.V., Barbashev S.V., Kravchenko V.P. Safety Assurance of NPP with VVER-SKD. – *Yaderna energetyka i dovkillya*. – 2015, №1. – P.4–10. (Rus)
3. Kelly J.E. Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation . – *Progress in Nuclear Energy*. – 2014, Vol. 77. – P. 240–246. (Eng)
4. Glebov A.P., Terentiev M.I. Development SCWR reactor prototype which is water-cooled at supercritical pressure under the GIF program (IFP-4). – *Atomnaia technika za rubezhom*. – 2014, № 5. –P. 3–17. (Rus)
5. Asmolov V.G., Semchenkov Yu.M., Sidorenko V.A. Look NPP with light-water power reactors of the next generation. – *Sedmaya mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoy energetiki»*. – Moskva, 26–27 maya 2010. – M: OAO «Kontsern Rosenergoatom», 2010. – P. 7–14. (Rus)
6. Semchenkov Yu. M., Sidorenko V.A. Prospects for the development of nuclear power plants with VVER . – *Teploenergetika*. – 2011, № 5. – P. 2–9. (Rus)
7. Agranat V., Malin M., Pioro I., Abdulla R., Perminov V.A. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow. Proceedings of ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan. – 2015. – Paper 1163. – 11 p. (Eng)
8. Vanyukova G.V., Kuznetsov Yu.N., Loninov A.Ya., Papandin M.V., Smirnov V.P. and Pioro I.L. Application of CFD Code to Calculations of Heat Transfer in a Fuel Bundle of SCW Pressure Channel Reactor// Proc. 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSCWR-4), March 8–11, 2009. – Heidelberg, Germany, 2009. – Paper 28. – 9 p. (Eng)
9. Farah A., Harvel G. and Pioro I. Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceedings of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-15), Pisa, Italy, May 12-15 2013. – Paper 118. – 13 p. (Eng)
10. Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O. Simulation of flow and heat transfer in the bure tubes at supercritical pressures. – *Promyshlennaia teplotekhnika*. – 2016. – №3. – P. 12–21. (Rus)
11. Mokry S., Pioro I.L., Farah A., King K., Gupta S., Peiman W. and Kirillov P. Development of Supercritical Water Heat-Transfer Correlation for Vertical Bare Tubes. – *Nuclear Engineering and Design*. – 2011, Vol. 241. – P. 1126–1136. (Eng)

Получено 16.06.2016
Received 16.06.2016

УДК 532.517

ПОЛЕ ШВИДКОСТІ ТА ВИХРОВИЙ РУХ УСЕРЕДИНІ НАПІВЦІЛІНДРИЧНОЇ ТРАНШЕЇ

Воскобійник В.А., доктор техн. наук, **Воскобійник А.В.**, канд. техн. наук

Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Желябова, 8/4, Київ, 03680, Україна

Представлено результати експериментальних досліджень особливостей формування та розвитку когерентних вихрових структур у напівциліндричній траншії, а також статистичні характеристики поля швидкостей. Визначено масштаби, місцезнаходження когерентних вихрових структур усередині траншії. Показано вплив вихрового руху в заглибленні на примежовий шар над пласкою поверхнею з локальною напівциліндричною траншеєю.

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования и развития когерентных вихревых структур в полуцилиндрической траншее, а также статистические характеристики поля скоростей. Определены масштабы, местоположение когерентных вихревых структур внутри траншее. Показано влияние вихревого движения в углублении на пограничный слой над плоской поверхностью с локальной полуцилиндрической траншеей.

The experimental research results of the features of formation and development of the coherent vortical structures in the half-cylindrical trench and also statistical characteristics of velocity field are submitted. The scales and location of the coherent vortical structures inside of the trench are determined. The influence of the vortex motion in the cavity on a boundary layer above a flat surface with the local half-cylindrical trench is shown.

Бібл. 15, рис. 4.

Ключові слова: поле швидкості, вихрова структура, напівциліндрична траншея.

d – діаметр траншії;

f – частота;

h – глибина траншії;

h/d – заглиблення траншії;

l – довжина траншії;

P(ω) – спектральна густина потужності пульсацій швидкості;

R – радіус траншії;

*U*₀ – швидкість потоку;

U – осереднена поздовжня швидкість;

u' – пульсації поздовжньої швидкості;

x, y, z – осі декартової системи координат;

*Re*_{*d*} = *U*₀*d*/*v* та *Re*_{*X*} = *U*₀*X*/*v* – числа Рейнольдса;

St = *fd*/*U*₀ – число Струхала;

δ – товщина примежового шару перед передньою стінкою траншії;

v – коефіцієнт кінематичної в'язкості води;

σ – дисперсія;

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота.

Індекси верхні:

* – нормування спектрів і частот.

Індекси нижні:

d – діаметр траншії;

X – відстань від носка пластини до передньої стінки траншії.

Вступ

Зі зменшенням кількості корисних копалин і зростанням їх ціни у енергозберігаючих технологіях, де використовується рух рідини або газу чи в них переміщуються різноманітні тіла, набувають широкого використання обтічні лункові поверхні. Вони мають унікальні гідродинамічні властивості, такі як зменшенні гідрравлічні витрати,

виникнення флюктууючого вихору в заглибленні, перевищення теплообміну над гідрравлічними витратами і деякі інші. Ці властивості використано з користю в різних галузях науки і техніки, таких як ядерна енергетика, теплообмінні системи, в тому числі в комунальній теплоенергетиці, газотурбінні установки та апарати для плавання і польотів [1-3]. Основний фізичний механізм дії

загиблень на потік, що їх обтікає – це генерація вихрових структур усередині лунок і викид їх у зовнішню течію. Когерентні вихрові структури суттєво впливають на розвиток примежового шару, відривних течій, процесів змішування і тепломасопереносу. Проблеми визначення просторово-часових характеристик когерентних структур, полів швидкості та тиску в локальних лункових генераторах вихорів, ідентифікації вихрових структур, вивчення механізмів їх генерації та еволюції актуальні не тільки в академічних дослідженнях, але й на практиці під час створення сучасних транспортних засобів та інтенсифікації процесів змішування й тепломасопереносу [1-3]. Загиблення на поверхні, яке обтікається рідиною, є джерелом звукових і псевдозвукових коливань (останні з яких обумовлені переносом когерентних вихрових структур) [4, 5]. Генерація коливальних тонів течією над видовженою траншеєю – це відоме явище, яке має місце в колісних сховищах та бомбових люках в літаках, щілинах на дверцях автомобілів, технічних нішах в корпусах суден. Рівні звукового і псевдозвукового тиску бувають такими високими, що спричиняють до шумових проблем всередині літаків, підводних човнів та автомобілів і руйнують делікатні інструменти та устаткування в самих канавках. Основна особливість течій в канавках чи кавернах є формування зсувного шару, який підсилює збурення потоку і наступне трансформування цих збурень в акустичні хвилі на кормовій стінці канавки [6]. Акустичні хвилі переносяться проти течії до передньої стінки канавки. Тут в зоні відриву примежового шару та зародження зсувного шару ці хвилі призводять до формування областей нестійкості, які викликають подальші збурення в зсувному шарі. Таким чином, замикається петля зворотного зв'язку, яка породжує автоколивання на дискретних резонансних частотах [4, 6, 7].

Історично вивчення автоколивань почалося з дослідження крайових тонів, при яких струмінь виходив з отвору та ударявся об гострий край. Механізм розвитку та формування крайових тонів схожий до механізму для кавітаційних коливань, про який згадувалося раніше: збурення підсилюються в зсувному шарі і трансформуються в акустичні хвилі, які виникають на гострому

краю. Акустичні хвилі породжують подальшу нестабільність зсувного шару, замикаючи, таким чином, петлю зворотного зв'язку. Крайові тони – це канонічна проблема, яка характеризує розповсюдження звуку в повітропровідних музичних інструментах, таких як флейта або органні труби і які близько відносяться до течій в видовженій канавці. Перший опис явища акустичного резонансу, який пов'язаний з коливаннями усередині канавок, належить Розіт'єру [8]. Він запровадив напівемпіричну формулу, яка дає можливість знайти частоти автоколивань.

У видовжених прямокутних загибленнях існує також інша мода коливань, до якої привернуто менше уваги і яка через це менше вивчена. В дослідах з нестисливою рідиною для віссесиметричної канавки в роботі [9] виявили сліду моду, за якою осцилююча течія над каверною нагадує слід за погано обтічним тілом. Слідна мода пов'язується зі значним збільшенням опору. Коли довжина прямокутної канавки зростає відносно товщини примежового шару на передньому краю загиблення виникають коливання рідини, які підпорядковуються принципу біфуркації. Ці коливання змінюються від моди зсувного шару (для коротких каверн) до слідної моди (для видовжених канавок). Особливості течії при слідній моді якісно відрізняються від тих, що мають місце при моді зсувного шару, які досліджував Розіт'єр.

Вивченю структури вихрової течії в по-перечно обтічній напівциліндричній траншеї присвячена дана робота. Мета цієї роботи – отримати кінематичні характеристики вихрової течії у траншеї та у примежовому шарі обтічної поверхні поблизу траншеї, а також знайти характеристики частоти коливального процесу як у самій траншеї, так і поблизу неї.

Експериментальна установка

Експериментальні роботи проводились на аеродинамічному стенді в Інституті гідромеханіки НАН України [10, 11]. Стенд був створений на базі аеродинамічної труби відкритого типу. Робоча ділянка труби мала циліндричну форму з внутрішнім діаметром 0,1 м та була зроблена з прозорої труби для проведення візуальних дослідів. Повітря з лабораторного

приміщення поступало до труби через конфузорний вхід у вигляді лемніскати Бернулі для зменшення збурення потоку та створення прийнятного ступеня турбулентності в аеродинамічній трубі. На виході з робочої ділянки труби стояв центробіжний насос, який всмоктував повітря через аеродинамічну трубу. Між робочою ділянкою і насосом знаходився проміжний гумовий циліндр для зменшення вібраційних перешкод від насоса. Рівні звукового тиску та вібрацій в робочій ділянці труби контролювались при проведенні дослідів. Під час створення стенду вібраакустичні шуми були виміряні й прийнята низка заходів по їх зменшенню і усуненню.

В діаметральній площині аеродинамічної труби в напрямку її поздовжньої вісі встановлювалась пласка пластина з локальним загибленим у вигляді напівциліндричної траншеї, яка обтікалась потоком. Пластина виготовлена з листа товщиною $4 \cdot 10^{-3}$ м, який був підсиленій ребрами жорсткості з нижньої неробочої сторони пластини. Ширина пластини складала 0,1 м, а довжина – 0,6 м. Передній і кормовий краї пластини були загострені для того, щоб усунути зони відриву примежового шару. На відстані 0,5 м від початку пластини було зроблено отвір, в якому розташовувалася напівциліндрична канавка. Канавка мала діаметр $20 \cdot 10^{-3}$ м та довжину $80 \cdot 10^{-3}$ м і обтікалась поперечним, відносно її повзводжньої вісі потоком. Швидкість потоку в дослідах змінювалась від 1 м/с до 20 м/с, що давало можливість дослідити ламінарний та турбулентний режими обтікання гідравлічно гладкої пласкої поверхні пластини з локальним загибленим. Для цих режимів течії числа Рейнольдса розраховані за швидкістю потоку та діаметром траншеї або відстанню від носка пластини до передньої стінки траншеї складали відповідно $Re_d = (1,4 \dots 24,6) \times 10^3$ і $Re_x = (3,7 \dots 67) \times 10^4$. Інтенсивність турбулентності набігаючого потоку за межами примежового шару над пластиною не перевищувала 3 %.

Поле швидкості над обтічною поверхнею та усередині траншеї вимірювалось за допомогою однониткового дротяного датчика, який підключався до мостової електричної схеми термоанемометра постійної температури

фірми Діза. Координатний пристрій дозволяє пересувати датчик з точністю $10 \cdot 10^{-6}$ м в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Контроль місцезнаходження датчика відносно обтічної поверхні проводився за допомогою лазерної установки.

Електричні сигнали від датчиків подавались на контрольно-вимірювальну апаратуру (вольтметри, осцилоскопи, частотоміри) і апаратуру реєстрації даних (четирьохканальний вимірювальний магнітофон фірми Брюль і К'ер). Зареєстровані електричні сигнали оброблялись на спеціалізованих спектроаналізуючих комплексах та через аналогово-цифрові перетворювачі подавались на персональні комп'ютери. На комп'ютерах, за розробленими програмами та методиками, дані оброблялись і аналізувались. За допомогою відповідного програмного забезпечення та графічних редакторів результати досліджень перетворювались у відповідні залежності.

Дротяні термоанемометри калібрувались та тестувались перед проведенням дослідів, під час дослідів, а також після закінчення робіт. Це давало можливість отримувати калібровочні залежності параметрів, які реєструються датчиками, що було використано під час обробки та аналізу експериментальних результатів.

Похибка під час вимірювання інтегральних та осереднених значень кінематичних характеристик вихрової течії у траншеї та над пластиною не перевищувала 10 % з достовірністю 0,95 або 2 σ. Спектральні характеристики поля пульсацій швидкості вимірювались з похибкою не більше 2 дБ у частотному діапазоні від 0,2 Гц до 1250 Гц.

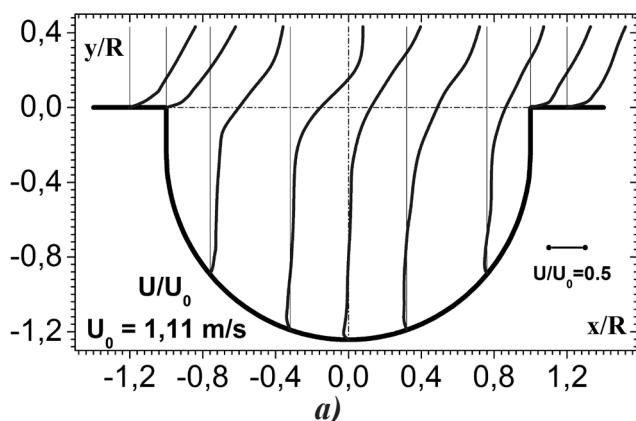
Окрім інструментальних дослідів проводились візуальні дослідження за допомогою димової візуалізації. Джерело диму знаходилось на поверхні пластини перед траншеєю. Картини візуалізації реєструвались за допомогою швидкісних кінокамер, відеокамер та цифрових фотоапаратів. Відео та фотоматеріал візуалізації з застосуванням відповідних програм та методик фіксувався на персональних комп'ютерах, де оброблявся і аналізувався. Похибка оцінки геометричних і кінематичних характеристик вихрового потоку та структури течії у траншеї та над пласкою пластиною не перевищувала (15...20) %.

Результаты дослідження і їх аналіз

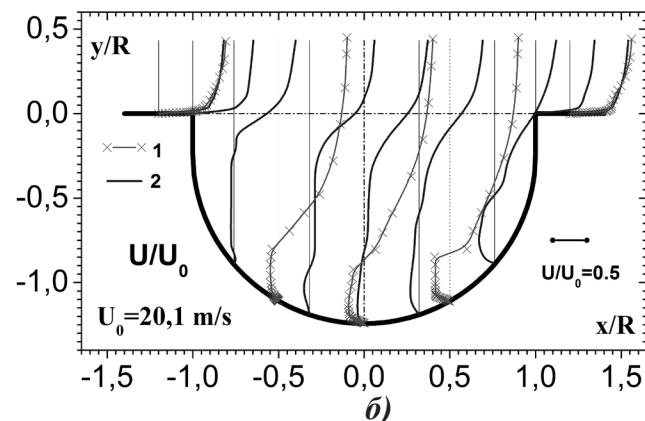
Під час проведення експериментальних досліджень були отримані осереднені та пульсаційні характеристики поля швидкості над обтічною поверхнею пластини і усередині напівциліндричної траншеї в її поперечному серединному перетині. На рис. 1 наведені профілі осередненої поздовжньої швидкості в траншеї та над пластиною, які отримані для ламінарного та турбулентного режиму течії. Дані отримано завдяки статистичній обробці результатів

вимірювання швидкостей на протязі однієї хвилини реєстрації даних. На рис. 1, а результати отримано для швидкості потоку $1,11 \text{ м/с}$, якому відповідають числа Рейнольдса $Re_d = 1360$ та $Re_x = 37000$. На рис. 1, б результати наведено для $U_0 = 20,1 \text{ м/с}$, $Re_d = 24600$ та $Re_x = 670000$. На цьому рисунку крива 1 відповідає даним Афанас'єва та ін. [12], які отримані для мілкої напівциліндричної канавки, а крива 2 – це результати даного дослідження.

Як показують результати досліджень, з



a)



б)

Рис. 1. Профілі осередненої поздовжньої швидкості усередині та над напівциліндричною траншеєю для ламінарної (а) і турбулентної (б) течії.

заглибленням в траншею має місце зниження середньої поздовжньої швидкості. В перерізі, яке знаходиться нижче середини траншеї, виокремлюється зона нульових значень поздовжньої осередненої швидкості. З наближенням до дна траншеї з'являється область зворотної течії, напрямок якої протилежний набігаючому потоку. Для ламінарного режиму зворотній потік майже непомітний, але зі збільшенням швидкості він стає все інтенсивнішим. При цьому зона зворотного потоку наближається від придонної області траншеї до її серединної частини (рис. 1, а та рис. 1, б). Таким чином, для турбулентного режиму усередині траншеї зареєстровано великомасштабну циркуляційну течію, центр якої знаходиться між геометричною серединою канавки та її дном. Такий циркуляційний рух рідини в траншеї напівциліндричної форми спостерігається як у представлених дослідах, так і в роботі [12]. Необхідно зазначити, що розташування центру

циркуляційної течії в цих двох дослідах загалом співпадає. Значення швидкостей на периферії циркуляційної течії, які показано на рис. 1, б, для двох умов досліджень мають розходження тому, що геометричні параметри траншеї в цих дослідах не співпадають.

Середньоквадратичні значення пульсацій поздовжньої швидкості ростуть у пристінній області примежових шарів над обтічною пластиною та усередині напівциліндричної траншеї, там, де спостерігається максимальна дія сил в'язкості. Крім того пульсації поздовжньої швидкості ростуть з наближенням до кормової стінки траншеї. Тут має місце найбільш нестійка взаємодія примежового шару, що формується над пластиною, з вихровими структурами зсувного шару та з великомасштабною вихрою системою, яка генерується усередині траншеї й викидається з неї назовні [13, 14]. Поблизу цієї області відбувається інтенсивна взаємодія вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою

поперечно обтічної траншеї та зароджується циркуляційна течія. Мінімальні значення пульсацій поздовжньої швидкості реєструються у тих місцях, де спостерігається зміна напрямку вектора осередненої швидкості, а саме в ядрі квазістійкого великомасштабного вихору, що формується усередині траншеї. Над кормовою стінкою траншеї пульсації поздовжньої швидкості суттєво перевищують значення, які фіксуються над передньою стінкою. Як показали досліди, зі збільшенням швидкості ця різниця збільшується.

Окрім осереднених швидкостей та їх пульсацій в поздовжньому напрямку були отримані і поперечні швидкості, що дало мо-

жливість побудувати векторні поля швидкості у заглибленні та поза ним. Побудовані ізотахи або лінії рівних осереднених швидкостей, які визначають кінематичні характеристики вихрового руху в траншеї та біля неї показано на рис. 2, а, а їх середньоквадратичні значення пульсацій представлено на рис. 2, б. Ці лінії рівних швидкостей отримано для швидкості 20 м/с і чисел Рейнольдса таких самих, як і для даних наведених на рис. 1, б. Цифри на ізолініях на рис. 2, а позначають середню швидкість відносно швидкості набігаючого потоку у відсотках. На рис. 2, б середньоквадратичні значення пульсації швидкості також нормовані швидкістю потоку.

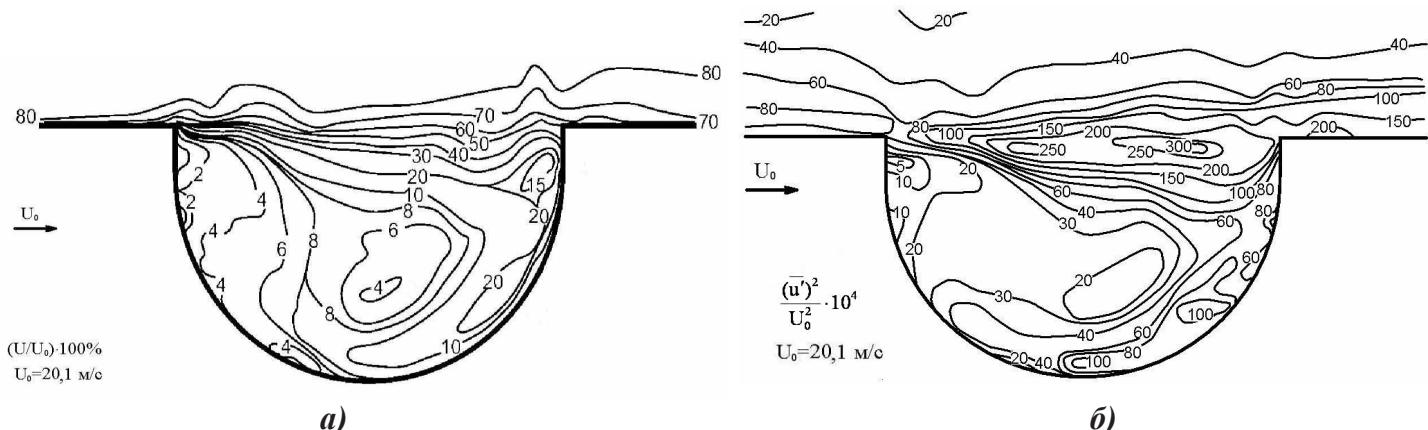


Рис. 2. Ізотахи осереднених швидкостей (а) та їх середньоквадратичних значень пульсацій (б) усередині та над напівциліндричною траншеєю, що обтікається турбулентним потоком.

У примежовому шарі, який утворюється над гідралічно гладкою поверхнею пластини, з'являються зони гальмування та прискорення, що обумовлено дією на нього заглиблення, зокрема вихровою течією, що має місце усередині заглиблення. Під час відриву примежового шару зароджується зсувний шар, який має хвилеподібну форму (наприклад, рис. 2, а), що обумовлено прискоренням та гальмуванням потоку усередині і назовні канавки, а також формуванням в ньому вихрових систем. Цей зсувний шар розширюється під час просування вздовж отвору канавки і з підходом його до кормової стінки він взаємодіє з останньою. При цьому одна частина зсувного шару пересувається на вихід із траншеї, гальмуючи рідину, яка рухається над поверхнею заглиблення, що

проілюстровано на рис. 2, а. Інша частина зсувного шару, який взаємодіє з кормовою стінкою, прямує вздовж дна траншеї до її переднього краю. Цей струменеподібний пристінний потік, перетинаючи середину траншеї підіймається до зсувного шару, подібно результатам, які спостерігав Роквелл [15] для прямоугольного заглиблення. Струменеподібний потік та нижня частина зсувного шару в отворі заглиблення формують циркуляційну течію у вигляді великомасштабного квазістійкого вихору. Великомасштабна когерентна вихрова структура розташовується в нижній придонній частині траншеї і займає майже третину її об'єму (подібно спостереженням Роквелла). В місці взаємодії зсувного шару з кормовою стінкою реєструються дрібномасштабні, але

високоенергійні вихрові структури, які конвектують із зсувним шаром. Нижче зони відриву примежового шару та формування зсувного шару біля передньої стінки і місця підйому струменеподібного потоку зароджується система дрібномасштабних когерентних вихрових структур малої енергії. Із зменшенням швидкості набігаючого потоку число, місце знаходження та масштаб квазістійких вихрових структур змінюється. Так, їх число зменшується, а розмір великомасштабного когерентного вихору збільшується і він переміщується близьче до централі заглиблення та до його передньої стінки.

Як показують результати досліджень, в області ядер вихрових систем пульсацій швидкості незначні, а на їх периферії – великі (рис. 2, б). Особливо великі рівні пульсацій швидкості спостерігаються в місцях зародження зсувного шару та в області його взаємодії з кормовою стінкою. Подібні тенденції формування поля пульсацій швидкості спостерігались як для ламінарного, так і турбулентного режимів обтікання пластиини з локальним заглибленням [10].

Спектральні характеристики поля пульсацій поздовжньої швидкості, зареєстрованої на рівні поверхні отвору напівциліндичної канавки в її серединному перетині показано на рис. 3. Тут зображені залежності спектральних густин потужностей пульсацій швидкості, які нормовані зовнішніми змінними δ та U_0 , а саме ($P^*(\omega) = P(\omega)\delta/[(\bar{u}')^2 \cdot U_0]$) від частоти ($\omega^* = \omega/\delta/U_0$) для швидкості $U_0 = 20,1$ м/с і чисел Рейнольдса $Re_d = 2,46 \times 10^4$ та $Re_x = 6,7 \times 10^5$. На цьому рисунку цифрами позначені криві, які відповідають різним координатам точок заміру швидкостей вздовж отвору траншеї (x/R). Відомо, що таке представлення спектральних залежностей дає можливість оцінити як інтенсивність пульсацій швидкості, так і їх частотне наповнення. Так, площини під спектральними кривими дорівнюють середнім значенням квадратів пульсацій поздовжньої швидкості віднесених до квадратів швидкості потоку.

Як показують результати досліджень, над передньою частиною отвору траншеї спектрами пульсацій поздовжньої швидкості притаманний монотонно змінний характер. Спектри мають

конвективний гребінь, який є характерною ознакою спектральних залежностей поля пульсацій швидкості або тиску у турбулентному примежовому шарі над гідрравлічно гладкою поверхнею. З наближенням до серединної частини траншеї в спектрах з'являються добре помітні дискретні складові, частоти та інтенсивність яких обумовлені дією вихрових структур, що генеруються усередині траншеї та викидаються назовні з неї (криві 4...8 на рис. 3).

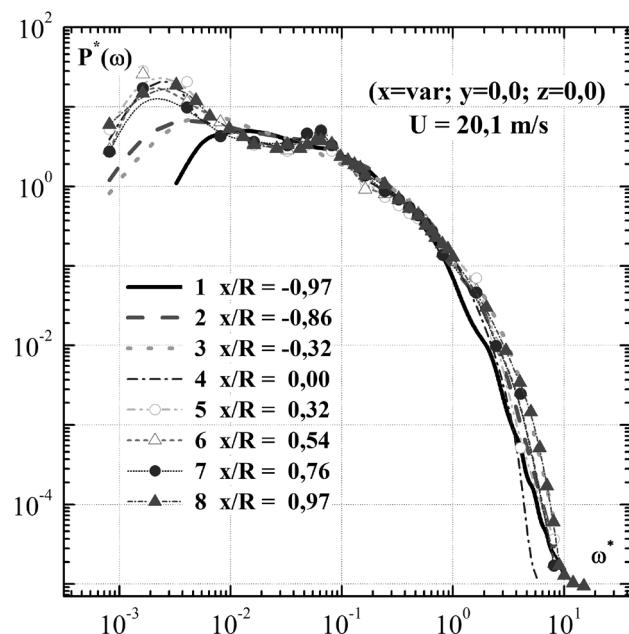


Рис. 3. Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості для серединного перетину напівциліндичної траншеї.

Згідно з рекомендаціями Бредшоу для більшої наглядності визначення домінуючих спектральних компонент використовуються перші моменти спектрів. На рис. 4 показано перші моменти спектральних густин потужностей пульсацій поздовжньої швидкості у вигляді $\omega P(\omega)$ в залежності від ω^* для тих же умов обтікання і координат розташування термоанемометричних датчиків, що й на рис. 3. Рис. 4 дає можливість оцінити вклад кожної частотної компоненти в загальну енергію поля пульсацій швидкості.

Установлено, що поблизу передньої стінки траншеї спектральні залежності мають монотонно змінний характер (криві 1, 2 та 3). З наближенням до серединної частини траншеї, де

струменеподібна пристінна течія підіймається до зсувного шару і взаємодіє з ним (рис. 2), в спектрах з'являються характерні особливості у вигляді дискретних піків. Ці піки спостерігаються від середини заглиблення і до його кормової стінки, що проілюстровано як на рис. 3, та і на рис. 4. Піки зосереджено в низькочастотному діапазоні $0.002 < \omega^* < 0.003$, якому відповідають частоти $f = (2...4)$ Гц, та $0.05 < \omega^* < 0.08$ або $f = (60...90)$ Гц. Подібні дискретні піки у відповідних частотних діапазонах спостерігались в середині напівциліндичної траншеї, де зароджувались квазістікі великомасштабні когерентні вихрові системи [10]. З віддаленням від передньої відривної стінки траншеї спектри наповнюються високочастотними компонентами, які обумовлено дією дрібномасштабних вихорів на поле пульсацій швидкості. Поблизу кормової стінки напівциліндичної траншеї з'являється ще один дискретний пік, який добре видно на рис. 4, що відповідає частотам $0.5 < \omega^* < 0.7$ або $f = (600...800)$ Гц.

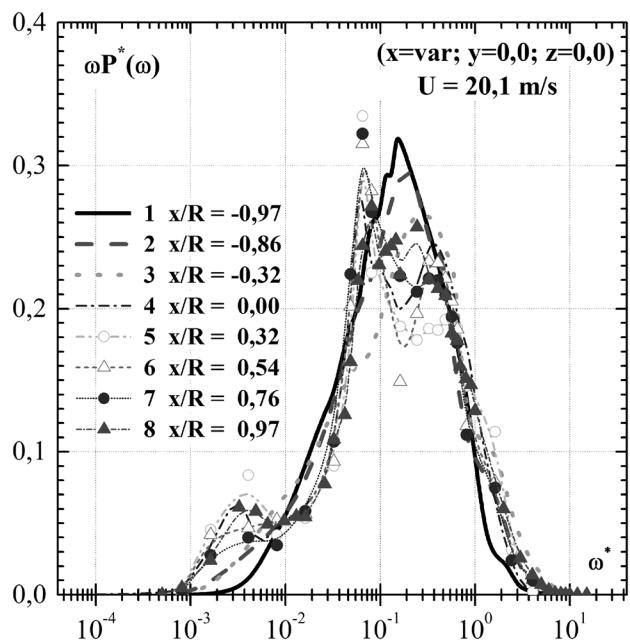


Рис. 4. Перші моменти спектрів пульсацій поздовжньої швидкості для серединного перетину напівциліндричної траншеї.

Таким чином, над серединною та кормовою частинами траншеї на рівні поверхні обтічної пластини спостерігаються характерні

особливості в спектральних залежностях пульсацій швидкості, які притаманні вихровому руху усередині заглиблення. Ці характерні особливості проявляються, зокрема, в появі дискретних піків в трьох частотних діапазонах. Перший діапазон $\omega^* = (0.002...0.003)$ обумовлений низькочастотним коливанням вихрового руху усередині поперечно обтічної траншеї, головним чином, вздовж її поздовжньої осі. Другий діапазон частот $\omega^* = (0.05...0.08)$ відповідає викидам великомасштабної вихрової системи або її частини назовні із траншеї, що підтвердилося під час аналізу візуалізації вихрової течії. Масштаб цієї квазістійкої вихрової структури для турбулентної течії над траншеєю оцінюється, як $0.3d$. Циркуляція великомасштабної когерентної вихрової структури, нормована зовнішніми змінними (швидкістю потоку та радіусом траншеї) складає 0.18. Дискретний пік у третьому частотному діапазоні обумовлений взаємодією вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою канавки. При цьому в заглибленні формуються автоколивання і вони відповідають другій зсувній моді Розіт'єра коливань усередині траншеї. Цим коливанням відповідає число Струхала $St = fd/U_0 = 0.64$. Отже, на рівні поверхні обтічної пластини в районі $-0.32 < x/R < 0$ починається викид вихрових систем або їх частин із траншеї у примежовий шар з частотою біля $(60...90)$ Гц для $U_0 = 20$ м/с та чисел Рейнольдса $Re_x = 6,7 \times 10^5$ і $Re_d = 2,46 \times 10^4$.

Висновки

Результати експериментальних досліджень інтегральних і спектральних залежностей поля швидкості усередині та поблизу поперечно обтічної напівциліндричної траншеї, яку розташовано на гідралічно гладкій плоскій поверхні, показали, що

- За характером зміни ліній рівних осереднених швидкостей та їх пульсацій, визначених із статистичного аналізу даних, витікає, що усередині траншеї генеруються квазістікі великомасштабні когерентні вихрові структури та дрібномасштабні вихори, число яких збільшується зростом швидкості потоку. Масштаб, місце розташування та форма великомас-

штабних вихорів змінюються в залежності від режиму течії, що викликає зміни в полі швидкості усередині траншеї поблизу неї.

2. Установлено, що загальними закономірностями змін інтегральних характеристик поля швидкості є: по-перше, наявність областей збільшення та зменшення значень поздовжньої швидкості над траншеєю, які чередуються між собою, обумовлені дією вихрових структур, що генеруються усередині траншеї, на примежовий шар; по-друге, збільшення середньої швидкості та її пульсацій з наближенням зсувного шару до кормової стінки траншеї; по-третє, поява в придонній області траншеї оберненої течії у вигляді пристінного струменя, яка зароджується в зоні взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою траншеї.

3. Визначено, що статистичні моменти вищих порядків розподілення поля пульсацій поздовжньої швидкості зазнають суттєвих змін усередині траншеї та в її близькому сліді відносно значень, які притаманні для турбулентних примежових шарів над гідрравлічно гладкими плоскими поверхнями. В спектральних залежностях з'являються дискретні складові, які відповідають характерним низькочастотним коливанням вихрового руху усередині траншеї, частоти яких складають число Струхаля порядку 0,003. Зокрема, в спектрах превалують складові на частотах викидів великомасштабних вихрових структур, що зароджуються усередині траншеї, назовні у примежовий шар, яким відповідає число Струхаля (0.05...0.08), а також на частоті, яку обумовлено другою зсувною модою автоколивань вихрових структур $St \approx 0.6$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермишина и С. А. Исаева. – М.: СПб., 2001. – 360 с.

2. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.

3. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелков А.В., Каськов С.И. Термогидравлическая эффективность перспективных способов

интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.

4. Воскобойник В. А. Просторово-часові характеристики когерентних структур, полів швидкості та тиску у лункових генераторах вихорів: Автореф. дис. д. т. н.: 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. / Інститут гідромеханіки НАН України. – Київ, 2013. – 40 с.

5. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, No. 4. – P. 709 – 722.

6. Lin J. – C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA J. – 2001. – 39, No. 6. – P. 1139 – 1151.

7. Cabell R. H., Kegerise M. A., Cox D. E., Gibbs G. P. Experimental feedback control of flow induced cavity tones // AIAA Pap. – 2002. – No. 2497. – P. 1 – 10.

8. Rossiter J.E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds // Aeronautical Research Council. – 1964. – Rep. Mem. No. 3438. – P. 1 – 36.

9. Gharib M., Roshko A. The effect of flow oscillations on cavity drag // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 177. – P. 501 – 530.

10. Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Пульсации скорости внутри поперечно обтекаемого полуцилиндрического углубления // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2012. – Вип. 2. – С. 25 – 30.

11. Турік В.М., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Вплив напівциліндричної канавки на інтегральні характеристики примежового шару над пластиною // Вісник НТУУ „КПГ”: Машинобудування. – 2012. – Вип. 64. – С. 47 – 55.

12. Афанасьев В.Н., Веселкин В.Ю., Леонтьев А.И. и др. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности: Препринт МГТУ им. Н.Э. Баумана № 2–91. Ч. 1. – М.: Изд-во МГТУ, 1991. – 56 с.

13. Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Циркуляційна течія у поперечно обтічній напівциліндричній траншеї // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2012. – Вип. 1. – С. 45 – 50.

14. Турик В.Н., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Вихревое движение в полуцилиндрической канавке на пластине // Промислова гіdraulіка і пневматика. – 2011. – Т. 33, №. 3. – С. 23 – 27.
15. Rockwell D. Vortex-body interactions // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – Vol. 30. – P. 199 – 229.

VELOCITY FIELD AND VORTEX MOTION INSIDE THE HALF-CYLINDRICAL TRENCH

Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V.

Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Zhelyabova, 8/4, Kyiv, 03680, Ukraine

The experimental research results of the features of formation and development of the coherent vortical structures in the half-cylindrical trench and also statistical characteristics of velocity field are submitted. The scales and location of the coherent vortical structures inside of the trench are determined. The influence of the vortex motion in the cavity on a boundary layer above a flat surface with the local half-cylindrical trench is shown.

References 15, figures 4.

Key words: velocity field, vortex structure, half-cylindrical trench.

1. *Body flow control* with vortex cells in supplement to aircraft of integral design (numerical and physical simulation) Ed. A.V. Ermishin and S.A. Isaev. – M.: SPb., 2001. – 360 p. (Rus.)

2. Khalatov A.A. Heat transfer and hydrodynamics about surface cavities (dimples). – K.: ITTF NASU, 2005. – 76 p. (Rus.)

3. Gortyschov Yu.F., Popov I.A., Olimpiev V.V., Stchelchkov A.V., Kaskov S.I. Heat-hydraulic efficiency of perspective methods of intensification of heat emission in the channels of heat-exchange equipment. – Kazan: Center of innovative technologies, 2009. – 531 p. (Rus.)

4. Voskoboinick V.A. Space-time characteristics of coherent structures, velocity and pressure fields into the dimpled vortex generators: Thesis doctor degree of engineering sciences by specialty 01.02.05 – mechanics of fluid, gas and plasma / Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, 2013. – 40 p. (Ukr.)

5. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust. – 2013. – Vol. 90, No. 4. – P. 709 – 722.

6. Lin J. – C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA J. – 2001. – 39, No. 6. – P. 1139 – 1151.

7. Cabell R. H., Kegerise M. A., Cox D. E., Gibbs G. P. Experimental feedback control of

- flow induced cavity tones // AIAA Pap. – 2002. – No. 2497. – P. 1 – 10.
8. Rossiter J.E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds // Aeronautical Research Council. – 1964. – Rep. Mem. No. 3438. – P. 1 – 36.
9. Gharib M., Roshko A. The effect of flow oscillations on cavity drag // J. Fluid Mech. – 1987. – Vol. 177. – P. 501 – 530.
10. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V. Velocity fluctuations inside cross-streamlined half-cylindrical cavity // Bulletin of Donetsk University, Series A: Natural Sciences. – 2012. – No. 2. – P. 25 – 30. (Rus.)
11. Turick V.N., Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V. Influence of half-cylindrical cavity on integral characteristics of wall boundary layer // Bulletin of NTUU ‘KPI’. Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 64. – P. 47 – 55. (Ukr.)
12. Afanasiev V.N., Veselkin V.Yu., Leontiev A.I. et al. Hydrodynamics and heat transfer by stream of single cavities on unconfigured state smooth surface. No. 2-91, pt. 1. – M.: MGTU, 1991. – 56 p. (Rus.)
13. Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. V. Circulation flow in the cross-streamlined half-cylindrical trench // Bulletin of Donetsk University, Series A: Natural Sciences. – 2012. – No. 1. – P. 45 – 50. (Ukr.)
14. Turick V. N., Babenko V. V., Voskoboinick V. A., Voskoboinick A. V. Vortex motion in the half-cylindrical cavity on a plate // Industrial Hydraulics and Pneumatics. – 2011. – Vol. 33, No. 3. – P. 23 – 27. (Rus.)
15. Rockwell D. Vortex-body interactions // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – Vol. 30. – P. 199 – 229.

Получено 29.05.2014
Received 29.05.2014

УДК 532.529:663.14. 033:663.143.2

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЭРАЦИИ КУЛЬТУРАЛЬНОЙ СРЕДЫ В МАССООБМЕННЫХ УСТАНОВКАХ С ДИСКРЕТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ВВОДОМ ЭНЕРГИИ ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ ХЛЕБОПЕКАРСКИХ ДРОЖЖЕЙ

Долинский А.А., академик НАН Украины, Ободович А.Н., д.т.н., Фищенко А.Н., к.т.н.,
Сидоренко В.В.

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

У статті представлено результати порівняння ефективності аерациї культурального середовища в двох типах масообмінних установок з дискретно-імпульсним введенням енергії в процесі культивування дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*.

Библ. 11, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: метод дискретно-импульсного ввода энергии, аэрирование, роторно-пульсационный аппарат, абсорбер, скорость массопередачи.

Из всего многообразия способов интенсификации тепломассообменных процессов в гетерогенных средах, лежащих в основе операций диспергирования, эмульгирования, растворения, катализа и др., метод дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) занял лидирующие позиции с точки зрения отношения величины вводимой энергии к уровню достигаемого результата. Исследованию данного феномена, определению механизмов и основных закономерностей трансформации и распределения вводимой в рабочую зону реализующих метод ДИВЭ устройств энергии посвящена достаточно обширная литература. Наиболее полно результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований данного метода изложены в [1].

Ранее авторами была поставлена серия экспериментов по аэрированию питательных и культуральных жидкостей в ферментационной установке с применением метода ДИВЭ [2,3]. Целью данных исследований было определение интенсивности абсорбции кислорода воздуха в данном процессе при изменении условий обработки, а также влияние интенсивности обработки на физиологическое состояние входящих в состав культуральной жидкости дрожжевых клеток. Ос-

В статье представлены результаты сравнения эффективности аэрации культуральной среды в двух типах массообменных установок с дискретно-импульсным вводом энергии в процессе культивирования дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

The article presents the results of comparing the efficiency of the aeration of the culture medium in the two types of mass transfer systems with discrete-pulse energy input in the process of cultivating the yeast *Saccharomyces cerevisiae*.

новным рабочим органом данной установки, в котором, собственно, реализуется метод ДИВЭ, являлся роторно-пульсационный аппарат (РПА) цилиндрического типа, пульсационный узел которого состоял из двух роторов и одного статора. Количество пазов и толщина межцилиндрового зазора варьировались. Таким образом, менялись частота пульсаций и скорость сдвига потока – основные характеристики работы РПА. Многократность обработки исследуемой среды осуществлялась за счёт рециркуляции. Подача воздуха в рабочую зону аппарата осуществлялась самовсасыванием за счёт эффекта Вентури а расходном трубопроводе.

Полученные данные позволяют уверенно говорить о том, что использование метода ДИВЭ при аэрировании культуральной жидкости в процессе культивирования дрожжей – сахаромицетов позволяет существенно сократить по сравнению с традиционными методами расход воздуха на аэрацию, а также увеличить удельную скорость роста дрожжей.

Следует, однако, отметить, что метод ДИВЭ реализуется не только в РПА. Так как метод ДИВЭ является методом комплексного воздействия на обрабатываемую среду, сочетающий в

себе ряд физических воздействий, актуальным становится вопрос о степени влияния каждого из них на конечный результат обработки. Таким образом, получение готового продукта в каждом конкретном процессе можно обеспечивать не только за счёт повышения или понижения уровня вводимой в аппарат энергии, но и за счёт выбора конструктивных особенностей пульсационного узла, а значит – усиления механизмов ДИВЭ, наиболее эффективных для данного конкретного процесса.

Исследования по применению метода ДИВЭ в технологиях, связанных с интенсификацией процесса массообмена в системе газ – жидкость, а также разработка массообменных аппаратов проводилась в Институте технической теплофизики НАН Украины в течение многих лет. В биотехнологиях метод ДИВЭ реализовывался путём резкого сброса давления в ферментёре [4], путём применения импульсного пульсатора [5] и т.д. Наиболее близким к РПА по принципу действия, а также по назначению, является разработанный в ИТТФ, аэратор – диспергатор, используемый для аэрации водоёмов [6], основным рабочим органом которого является роторно-дисковый аппарат.

Так, исследования по дискретно-импульсной подаче газа на процесс абсорбции в экспериментальной установке с применением диспергатора представлены в [7]. Целью данной работы являлось исследование размеров образующихся в воде пузырьков воздуха в процессе барботажа путём замены постоянного расхода газа через единичное отверстие (сопло) прерывистым. Для стабилизации размеров пузырьков воздуха использовался алкилтриметиламониевый хлорид. Установка представляла собой ёмкость в днище которой располагался диспергатор, соединённый с компрессором. Диспергатор состоял из трёх перфорированных соосных дисков (двух неподвижных и одного подвижного). Средний диск приводился в движение электродвигателем. Полученные данные свидетельствовали о том, что при подаче воздуха под давлением от компрессора на выходе диспергатора образовывалось поле распределённых в жидкости мелких воздушных пузырьков или газовая эмульсия [8]. Данное дробление происходило за счёт порционной подачи

газа за счёт периодически совпадающих отверстий ротора – статора. Размеры пузырьков зависели как от расхода газа, так и от размера отверстий в дисках, однако, основное влияние данный параметр оказывала частота вращения подвижного диска (ротора). Таким образом, решалась основная проблема барботажных аппаратов – создание изолированных друг от друга пузырьков воздуха субмиллиметровых размеров. Подобный приём позволил создать значительную поверхность раздела фаз.

Дальнейшие работы по применению метода ДИВЭ, реализующегося в диспергаторе, проводились в процессе насыщения жидких сред растворимым газом (сатурации) в технологии получения газированных напитков [9]. Технология и установка синхронно-смесительного типа были разработаны на основе абсорбера СА-100, действующего по принципу, описанному выше. Основное внимание авторы уделяют описанию основных диспергирующих и массообменных эффектов, которые связаны с импульсной подачей газа, созданием регулярных пульсаций давления в отверстиях дисков и образованием турбулентных струй пузырьковой газожидкостной дисперсии в потоке газирующей жидкости. Авторами установлено, что при совпадении частоты естественных колебаний объемов газа в отверстиях ротора с частотой пульсаций давления наблюдается явление резонанса, благодаря чему резко увеличивается амплитуда колебаний поверхности раздела фаз с потерей её устойчивости и, как следствие, дробление газа на микропузырьки. Коэффициент массопередачи при этом увеличивается на порядок. Определение коэффициентов массопередачи газа в жидкость рассчитывалось путём ввода понятия эквивалентного сферического пузыря (ЭП). По мнению авторов, во время пульсаций объема газа в окрестностях отверстия генерируются стационарные колебания давления определенной частоты и под их воздействием происходят колебания формы сферических пузырьков, имеющих собственную частоту колебаний. Благодаря явлению резонанса в аппарате пузырьки газа в струе не дробились, а частично растворившись в струе, распределялись в турбулентном потоке жидкости в проточной части, где полностью растворялись.

Таким образом, применение диспергатора (абсорбера) роторно-дискового типа в позволяет решать задачи того же характера, что и РПА а именно аэрированию культуральных жидкостей в ферментационной установке методом ДИВЭ в процессе культивирования дрожжей.

Принципиальным отличием в обработке культуральной жидкости между двумя указанными аппаратами заключаются в том, что распределенные в питательной среде дрожжевые клетки не проходят через прорези роторно-дискового узла аппарата и, следовательно, не подвергаются влиянию в полной мере комплекса механических, гидродинамических и гидроакустических воздействий, возникающих в пазах РПА в процессе обработки жидких сред с наличием твёрдых включений, могущих стать причиной замедления роста клеток или их гибели [10].

Аппаратурно-технологическая схема ферментационной установки с применением абсор-

бера представлена на рис. 1. Установка включает в себя бункер 1, полезным объёмом 60 л, снабженный охлаждающей рубашкой 6. Внутри бункера располагается внутренний цилиндрический стакан Нижняя часть бункера посредством трубопровода соединена со всасывающим патрубком центробежного насоса 4. Напорный трубопровод соединен с входным патрубком корпуса абсорбера. Патрубок с противоположной стороны абсорбера соединён с трубопроводом, по которому газожидкостная смесь возвращается в бункер. Сам абсорбер 2 представляет собой цилиндрическую камеру, в донной части которой располагается пульсационный узел, представляющий собой три диска диаметром 210 мм и толщиной 5 мм, двух неподвижных статора и подвижного ротора. Каждый из дисков имеет по три ряда сквозных отверстий диаметром 3 мм, расположенных вдоль условных концентрических окружностей. Общее число отверстий – 160 шт.

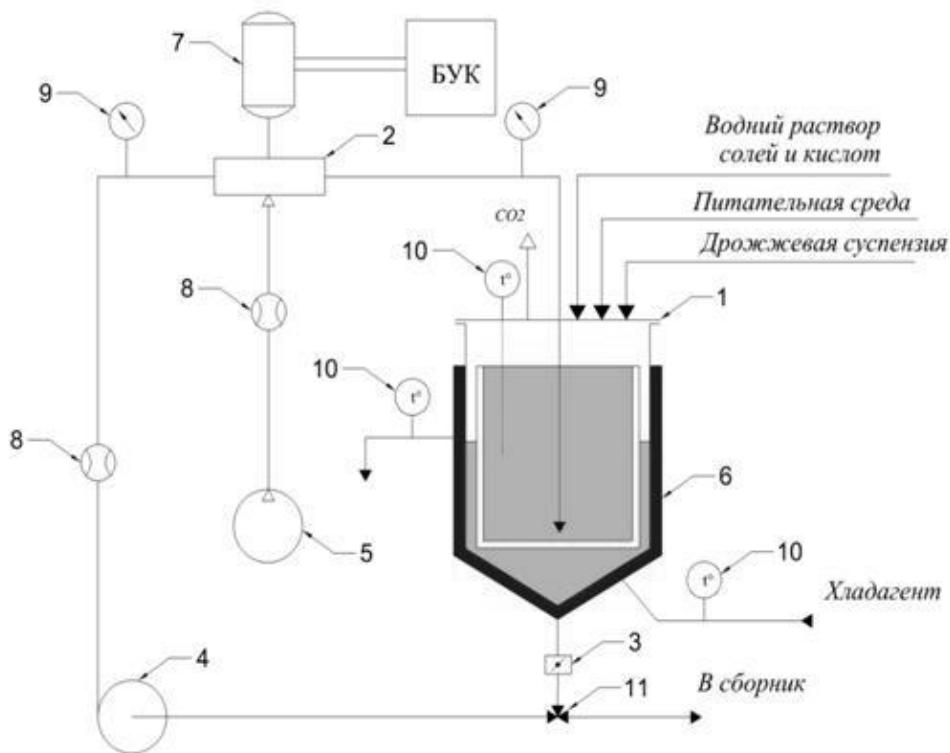


Рис. 1. Аппаратурно-технологическая схема тепломассообменной установки для культивирования микроорганизмов на абсорбере: 1 – бункер; 2 – абсорбер; 3 – заслонка; 4 – центробежный насос; 5 – компрессорная установка; 6 – рубашка охлаждения; 7 – электродвигатель; 8 – расходомер; 9 – манометр; 10 – термометр; 11 – трехходовой кран; БУК – блок управления и контроля.

Воздух на аэрацию поступает в газовую камеру, расположенную под пульсационным узлом. Ротор вращается электродвигателем. Частота оборотов ротора регулируется изменением частоты вращения ведущего вала. Воздух поступает в абсорбер от компрессора. Установка снабжена контрольно-измерительной аппаратурой.

Сравнение эффективности установок с абсорбера и РПА в процессе аэрации культуральных жидкостей базируется на двух составляющих – количестве накопленной биомассы за время культивирования, а значит скорости массопереноса кислорода, и потреблённой при этом мощности. Параметры работы оборудования подбирались таким образом, что бы обеспечить равенство

скорости потока жидкости во входном патрубке РПА (абсорбера) и равенство объёма подаваемого в рабочую зону воздуха.

В ферментационной установке с РПА роторно-пульсационный аппарат совмещает в себе функцию аэратора и функцию насоса, обеспечивающего движение культуральной жидкости по контуру. В установке с абсорбера эти задачи выполняются разными устройствами. Для перекачивания жидкости был выбран насос КМ 50-32-125, обладающий сходными с РПА техническими характеристиками.

Технические характеристики насоса и РПА представлены в табл.1.

Таблица 1. Технические характеристики перекачивающих устройств ферментационных установок на базе абсорбера и на базе РПА

| | КМ 50-32-125 | РПА |
|------------------------------------|--------------|-----|
| Объёмный расход, м ³ /с | 12,5 | 9 |
| Напор, м в.ст. | 20 | 10 |
| Потребляемая мощность, кВт | 2,2 | 3,0 |

Вращательное движение ротора абсорбера обеспечивается электродвигателем мощностью 1,5 кВт.

Подача воздуха в абсорбер осуществляется с помощью компрессорной установки УК-40-2М (компрессор безмаслянный) с номиналь-

ным рабочим давлением 2 кгс/см² (196 кПа), производительностью 34 л/мин (0,6 л/с). Максимальное давление 3,5 кгс/см² (343 кПа). Производительность 75 л/мин (1,25 л/с). Потребляемая мощность при номинальном напряжении (220 В, 50 Гц) и номинальном давлении 550 ВА (0,33 кВт).

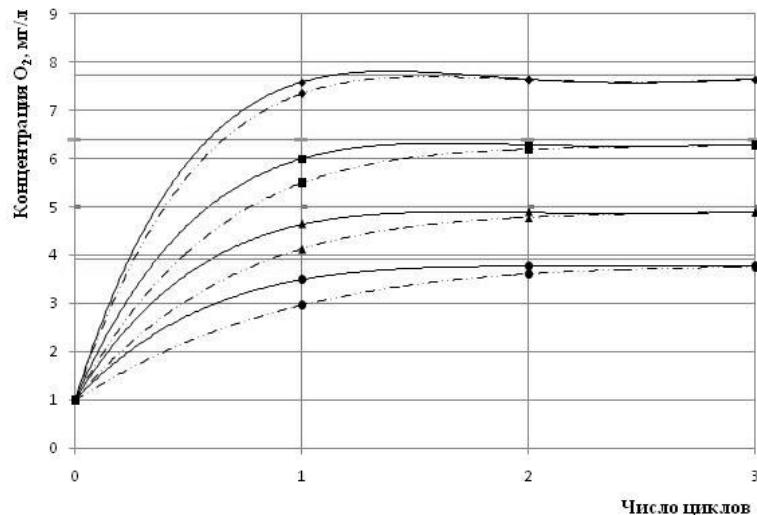


Рис. 2. Зависимость концентрации растворённого кислорода от количества циклов обработки при концентрации СВ: ♦ – вода; ■ – 3 %; ▲ – 5 %; ● – 10 %.

Сплошная линия – установка с РПА, пунктирная – с абсорбером.

Определение степени аэрации питательной и культуральной жидкости проводилось по методике, представленной в [2,3]. Оптимальные параметры работы РПА представлены в [11].

Зависимость концентрации растворённого кислорода от количества циклов обработки определялась на растворе мелассы с содержанием сухих веществ 10, 5 и 3 %. Объём жидкости составлял 30 л. Время одного цикла обработки составляло 15 с. Частота вращения роторного узла в РПА и ротора в абсорбере 47,75 об/с. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при использовании абсорбера, кислород растворяется в среде на 25 % медленнее, чем в РПА, таким образом, насыщение среды происходит не за два, а за три цикла обработки, что становится особенно важным при обработке больших объёмов жидкости.

Дальнейшие исследования заключались в определении скорости массопереноса кислорода при культивировании дрожжей – сахароми-

цидов на питательной среде с содержанием сухих веществ 10 %. Результаты представлены на рис. 2, как зависимость удельной скорости массопереноса кислорода от частоты вращения ротора.

Полученные данные свидетельствуют о том, что скорость растворения кислорода в установке с абсорбера ниже, чем в РПА. Однако, если в РПА при угловых скоростях вращения вала, больших, чем 47,75 об./с скорость массопереноса условно уменьшается, что объясняется увеличением числа повреждённых клеток, то в установке с абсорбером рост клеток продолжается, а значит продолжается потребление кислорода [рис. 3].

Важным вопросом при обработке культуральных сред является физиологическое состояние дрожжей и количество погибших в процессе обработки клеток. Результаты сравнения числа повреждённых клеток за время культивирования в ферментационных установках с абсорбером и РПА в качестве аэрирующих устройств, представлены в таблице 2.

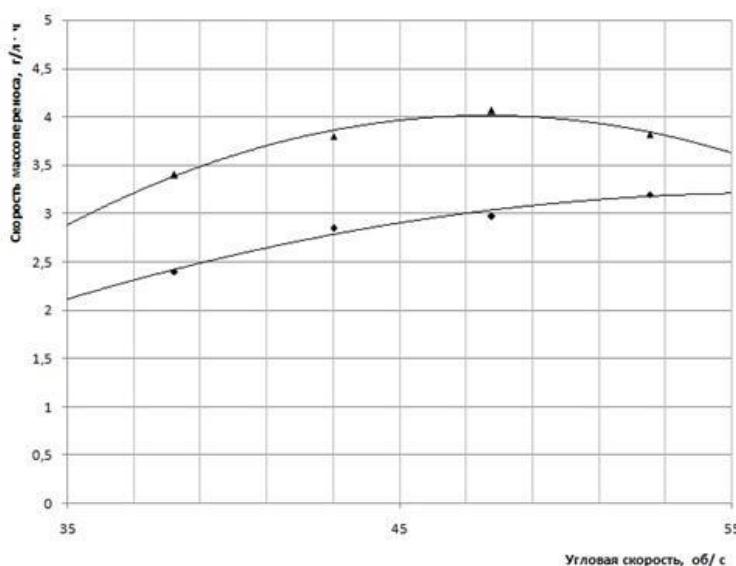


Рис. 3. Зависимость скорости массопереноса кислорода от угловой скорости вала при концентрации СВ 10 %: ◆ – абсорбер; ▲ – РПА.

Табл. 2. Количество повреждённых клеток за время культивирования в ферментационных установках с абсорбером и РПА

| Тип аэрирующего устройства ферментационной установки | Время культивирования, час | | | | | | | | |
|--|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Абсорбер | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| РПА | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 |

Полученные данные свидетельствуют о том, что обработка в абсорбере в исследуемом нами диапазоне угловых скоростей вращения ротора не оказывает отрицательного влияния на дрожжи, что является безусловным преимуществом данного аппарата, обработка же в аппарате с РПА приводит к появлению повреждённых клеток.

Табл. 3. Энергетические затраты на производство дрожжевой биомассы

| Часовой прирост, кг/ч | Удельные энергозатраты, кВт·ч/кг | |
|-----------------------|----------------------------------|----------|
| | РПА | абсорбер |
| 0,85 | 2,11 | 2,64 |
| 1,09 | 2,29 | 2,87 |
| 1,04 | 3,36 | 4,2 |

Выводы

- проведено сравнение работы ферментационных установок с дискретно-импульсным вводом энергии, реализуемым в абсорбере и роторно-пульсационном аппарате в процессе выращивания дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*;
- установлено, что в установке с РПА кислород растворяется на 20 % быстрее, чем в установке с абсорбераом;
- установлено, что при частотах оборотов роторов РПА и абсорбера до 47,75 об./с корость массопереноса кислорода в установке с РПА на 20 % выше, чем в установке с абсорбераом, однако, с увеличением частоты выше этого значения разница в скорости массопереноса кислорода снижается, что вызвано увеличением числа повреждённых клеток в установке с РПА, чего в установке с абсорбераом не наблюдается;
- установлено, что энергозатраты на аэрацию культуральной жидкости при культивировании кормовых дрожжей в установке с абсорбераом на 25 % выше, чем в установке с РПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общ. ред. А.А. Долинского – К.: Академпредиодика, 2015. – 464 с.*
2. *Ободович А.Н. Исследование абсорбции кислорода воздуха в ферментационном аппарате с дискретно-импульсным вводом энергии / А.Н. Ободович, А.Н. Фищенко, В.В. Сидоренко // Промышленная теплотехника. – 2016. – Т.38, № 2. – с. 33-38.*

Основным параметром, определяющим эффективность установки, является расход энергии на проведение процесса. В таблице 3 представлены энергозатраты на производство килограмма дрожжевой биомассы в установке с РПА и установке с абсорбераом соответственно.

Ободович, А.Н. Фищенко, В.В. Сидоренко// Промышленная теплотехника. – 2016. – Т.38, № 2. – с. 33-38.

3. *Ободович А.Н. Влияние механизмов ДИВЭ на скорость массопереноса и рост микроорганизмов / А.Н. Ободович, А.Н. Фищенко, В.В. Сидоренко // Промышленная теплотехника. – 2016. – Т.38, № 1. – с. 25-30.*

4. *А.с. 787457 (СССР). Способ аэрирования жидкости при выращивании микроорганизмов / О.А. Кремнев, А.А. Долинский, А.А. Корчинский и др. – Опубл. в Б.И., 1980, №46.*

5. *А.с. 672155 (СССР). Способ насыщения жидкости газом / О.А. Кремнев, А.А. Долинский, А.А. Корчинский, Я.И. Коренберг. – Опубл. в Б.И., 1979, № 25.*

6. *А.с. 735290 (СССР). Устройство для импульсной аэрации жидкости / О.А. Кремнев, А.А. Долинский, А.А. Корчинский и др. — Опубл. в Б.И., 1980, № 19.*

7. *Долинский А.А. Исследование влияния импульсно-дискретной подачи газа с частотой 1000...5000 Гц на процессы абсорбции / А.А. Долинский, А.А. Корчинский, В.В. Панчишин // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т.5, № 3. – с. 30-33.*

8. *Бошенятов Б.В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред. // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т.308, №6. – С.161-164.*

9. *Долинский А.А. Энергосберегающие абсорбционные технологии в производстве газированных напитков / А.А. Долинский, Б.И. Басок,*

О.К. Шетанков, А.И. Чайка// Промышленная теплотехника. – 2001. – Т.23, № 4-5. – с. 137-140.

10. Грабова Т.Л. Диспергирование гетерогенных систем в роторно-пульсационных аппаратах дисково-цилиндрического типа: дис. кандидата техн. наук / Т. Л. Грабова. – К., 2007. – 124 с.

11. Ободович А.Н. Особенности гидродинамической обработки питательных сред в роторно-пульсационном аппарате / А.Н. Ободович, Т.Е. Мудрак, В.В. Сидоренко/ / Промышленная теплотехника. – 2016. – Т.38, № 3. – с. 22-28.

COMPARISON OF EFFECTIVENESS OF AERATION OF THE CULTURE MEDIUM IN THE MASS TRANSFER SETUPS WITH DISCRETE-PULSED INPUT OF ENERGY DURING CULTIVATION OF BAKERY YEAST

A. Dolinskiy, A. Obodovich , A. Fischenko,
V. Sidorenko

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

Key words: method of discrete-pulse energy input, aeration, rotary pulsation apparatus, the absorber, the rate of mass transfer.

The article provides an overview of the scope of devices that implement the DPIE method for intensification of mass transfer processes in the system of gas – liquid. Mass transfer plants with RPA and absorber and their features and operating principle are considered. The results of comparison of plants during aeration culture media for growing yeast *Saccharomyces cerevisiae* are determined. The data on the solubility of oxygen, the mass flow rate and the number of damaged cells. The energy costs for production of yeast biomass for each plant are determined.

References 11, tables 3, figures 3.

1. *Micro- and nano-tiered processes in DPIE technologies: Thematic collection of articles/ by edition A.Dolinskiy.* – K.: Akademperodika, 2015. – 464 p. [Rus].

2. *Obodovich A.N. The study of atmospheric oxygen absorption in the fermentation unit with discrete-pulse energy input / A.N. Obodovich, A.N. Fischenko, V.V. Sidorenko // Promyishlennaya teplotekhnika.* – 2016. – vol. 38, №2 – p. 33-38 [Rus].

3. *Obodovich A.N. Effect mechanisms of DPIE on mass transfer rate and the growth of*

microorganisms/ A. N. Obodovich, A.N. Fischenko, V.V. Sidorenko// *Promyishlennaya teplotekhnika.* – 2016. – vol. 38, №1 – p. 25-30 [Rus].

4. *O.A. Kremnev, A.A. Dolinskiy, A.A. Korchinskiy et al. The process fluid aeration for growing microorganisms / Certificate of authorship USSR, no 787457, 1980 [Rus].*

5. *O.A. Kremnev, A.A. Dolinskiy, A.A. Korchinskiy, Ya.I. Korenberg. Method of saturation liquid with gas / Certificate of authorship USSR, no 672155, 1979 [Rus].*

6. *O.A. Kremnev, A.A. Dolinskiy, A.A. Korchinskiy et al. Device for pulsed aeration of liquid / Certificate of authorship USSR, no 735290, 1980 [Rus].*

7. *Dolinskiy A.A. Investigation of the effect of pulse-discrete gas supply with a frequency of 1000...5000 Hz on the absorption process / A.A. Dolinskiy, A.A. Korchinskiy, V.V. Panchishin. – Promyishlennaya teplotekhnika. – 1983. – vol. 5, №3 – p. 30-33. [Rus].*

8. *Boshenyatov B.V. Hydrodynamics of microbubbles of gas-liquid media/B.V.Boshenyatov. Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2005. – vol. 308, №6 – p. 161-164. [Rus].*

9. *Dolinskiy A.A. Energy saving absorption technology in the production of carbonated beverages / A.A. Dolinskiy, B.I. Basok, O.K. Shetankov, A.I. Chayka. – Promyishlennaya teplotekhnika. – 2001. – vol. 23, № 4 – 5. – p. 137-140 [Rus].*

10. *Grabova T. Dispersion of heterogeneous systems in a rotary-pulsation apparatus of disc-cylindrical type, PhD dissertation (Engineering). Institute of engineering thermophysics, 2007 [Rus].*

11. *Obodovich A.N. Peculiarities of hydrodynamic processing of the nutrient medium in the rotor-pulsation apparatus/ A.N. Obodovich, T. E. Mudrak, V.V. Sidorenko . – Promyishlennaya teplotekhnika. – 2016. – vol. №3, p. 22-28 [Rus].*

Получено 23.06.2016
Received 23.06.2016

УДК 664.723.047

ЦИКЛИЧЕСКАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ СУШКА ПЛОТНОГО СЛОЯ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бошкова И.Л., докт. техн. наук, Волгушева Н.В., канд. техн. наук

Одесская национальная академия пищевых технологий. Дворянская 1/3, Одесса 65012, Украина

Наведено результати експериментального дослідження кінетики циклічної мікрохвильової сушки щільного шару зерна при різних тривалостях продувки. Визначено вплив температури повітря при продуванні шару на основні характеристики процесу. Визначені режимні параметри для оптимальної циклічної сушки, встановлена якісна залежність швидкості сушіння в різні періоди циклів від тривалості процесу.

Библ. 6, табл. 3, рис. 3.

Ключевые слова: сушка, зерно, плотный слой, эффективность, микроволновой подвод энергии.

N – скорость сушки;

Q – затраты энергии;

t – температура;

U – влагосодержание;

τ - время.

Индексы нижние:

V – воздух;

k – конечное;

MB – микроволновая;

прод – продувка;

ср – среднее;

уд – удельные.

Сушка зерновых требует больших затрат энергии, для снижения которых совершенствуются существующие и разрабатываются новые инновационные технологии. Как показывают результаты исследований, в условиях микроволнового нагрева возникает возможность сокращения удельных затрат энергии [1-3], при этом комбинированные способы позволяют поддерживать требуемый температурный режим и высокую скорость сушки [4]. Одним из таких комбинированных методов является циклическая сушка, при которой периоды подвода микроволновой энергии чередуются с периодами продувки слоя сушильным агентом (к примеру, воздухом). В то же время для получения рациональных ре-

Приведены результаты экспериментального исследования кинетики циклической микроволновой сушки плотного слоя зерна при различных длительностях продувки. Установлено влияние температуры воздуха при продувке слоя на основные характеристики процесса. Определены режимные параметры для оптимальной циклической сушки, установлена качественная зависимость скорости сушки в различные периоды циклов от длительности процесса.

The results of experimental studies of the kinetics of cyclic microwave drying for thick layer of grain at different durations purge are presented. The effect of temperature of air while purging layer on the main characteristics of the process established. Operating parameters for optimum cyclic drying identified, qualitative dependence of the drying rate at different periods of cycles of processing time established.

жимов целесообразно провести анализ не только средних величин, характеризующих интенсивность сушки за весь период, а проследить их изменение в каждом цикле.

Целью исследований являлось определение влияния продолжительности продувки слоя зерна воздухом, без предварительного подогрева и нагретым, на основные характеристики процесса сушки (средняя температура материала, скорость сушки, удельные энергозатраты), и выбор оптимального режима при циклическом подводе микроволновой энергии. Схема микроволновой экспериментальной установки для исследования процессов тепломассопереноса при сушке зерновых материалов представлена на рис. 1.

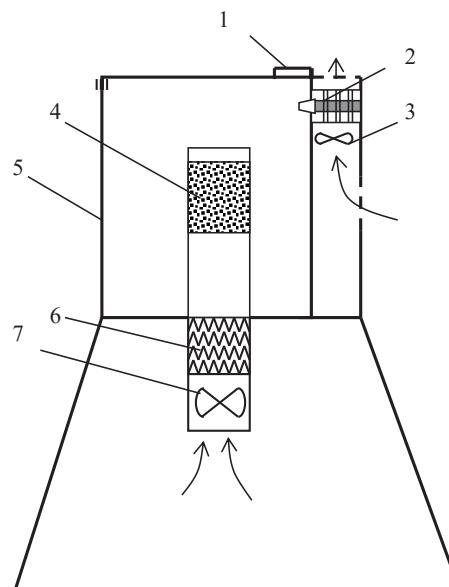


Рис. 1. Схема установки для исследования кинетики сушки зерновых материалов при микроволновом и конвективном нагреве:
1 – дверца, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системы охлаждения магнетрона, 4 – экспериментальная ячейка с материалом для исследований, 5 – рабочая камера, 6 – электронагреватель, 7 – вентилятор.

Установка обеспечивает проведение исследований при микроволновой, микроволново-конвективной и конвективной сушке. Внутри рабочей камеры установлен воздуховод из радиопрозрачного материала, в который помещалась ячейка, изготовленная в форме параллелепипеда из сетчатого материала. В экспериментальную ячейку засыпалось заданное количество зерна. Методика проведения экспериментов состояла в следующем. В микроволновую установку загружалось 100 г зерна (овес) с начальным влагосодержанием 0,2 кг/кг. Сушка зерна проходила в циклическом режиме. Длительность периода МВ нагрева во всех опытах составляла $\tau = 10$ с, выходная мощность магнетрона соответствовала 600 Вт. Длительность периода продувки варьировалась: 10, 20 и 30 с. После каждого из периодов образец извлекался, проводились замеры температуры и массы зерна, после чего в ячейку засыпалась новая порция зерна с таким же начальным влагосодержанием, и процесс длился на соответствующий период больше. Температура воздуха составляла 20 °C, скорость фильтрации в

слое зерна – 1 м/с, расход – 0,0118 кг/с. Начальная температура зерна – 20 °C. Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при продувке слоя ненагретым воздухом (конечные для каждого из периодов влагосодержания u_k , температура t_{cp} и скорость сушки N) приведены в табл. 1.

Увеличение длительности продувки приводит к снижению температуры слоя, при этом влагосодержание в конце всех трех опытов практически одинаково.

Исследование сушки зерна при продувке предварительно нагретым воздухом проводилось по приведенной выше методике, воздух нагревался электронагревателем 6 (рис. 1). Температура зерна в период продувки нагретым воздухом снижается менее существенно, чем при продувке холодным воздухом (табл. 2), что определяет большую равномерность сушки. Скорость воздуха – 1 м/с.

Анализируя данные по сушке с применением нагретого воздуха, можно отметить, что средняя скорость в период продувки длительностью $\tau_e = 10$ с выше, а удельные затраты ниже, чем при $\tau_e = 20$ с, поэтому этот режим является предпочтительным. Однако продувка нагретым воздухом, даже при температуре 50 °C, приводила к недопустимому росту температуры зерна. Сравнительный анализ результатов позволяет сделать вывод, что оптимальной является сушка с продувкой слоя без предварительного подогрева воздуха. В этих режимах при высокой скорости сушки, сопоставимой со скоростью при продувке нагретым воздухом, удельные затраты энергии ниже. Скорость сушки при длительности продувки 10 с выше для воздуха при $t_e = 20$ °C, чем при $t_e = 50$ °C. Для режимов с $t_e = 20$ °C при продувке слоя ненагретым воздухом скорость сушки резко снижается, что связано с понижением температуры зерна. На интенсивность выхода влаги из зерновки оказывает влияние возникновение избыточного давления с ростом температуры при микроволновом нагреве. В соответствии с данными [5], при сушке в электромагнитном поле при температуре от 45 °C до 95 °C (а по результатам наших исследований микроволновой сушки плотного слоя зерна – для 70 °C [4]), возникает градиент давления, который интенсифицирует

перенос влаги. Отмечается, что при выключении источника электромагнитного поля избыточное давление релаксирует не мгновенно вследствие сопротивления молярному переносу внутри тела. Если до температуры 70 °С избыточное давление

равно нулю, и перенос молекул воды описывается законами неизотермической диффузии влаги [5], то при дальнейшем повышении температуры возникающий градиент давления приводит к интенсификации выхода влаги к поверхности зерновки.

Табл. 1. Характеристики сушки плотного слоя зерна (овес) при циклическом подводе микроволновой энергии. Продувка слоя воздухом без предварительного подогрева

| Цикл | Период | u_k , кг/кг | t_{cp} , °C | N , с^{-1} | u_k , кг/кг | t_{cp} , °C | N , с^{-1} | u_k , кг/кг | t_{cp} , °C | N , с^{-1} | |
|------|--------|-------------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|--|
| | | $\tau_{\text{прод}} = 10 \text{ с}$ | | | | $\tau_{\text{прод}} = 20 \text{ с}$ | | | | $\tau_{\text{прод}} = 30 \text{ с}$ | |
| 1 | МВ | 0,199 | 53,5 | 0,0001 | 0,1990 | 41,5 | 0,0001 | 0,198 | 40,3 | 0,0002 | |
| | П | 0,195 | 46,5 | 0,0004 | 0,1930 | 33 | 0,0003 | 0,192 | 27 | 0,0002 | |
| 2 | МВ | 0,194 | 70,5 | 0,0001 | 0,1913 | 51,5 | 0,00017 | 0,191 | 44 | 0,0001 | |
| | П | 0,190 | 57 | 0,0004 | 0,1827 | 45,5 | 0,00043 | 0,184 | 39,3 | 0,0002 | |
| 3 | МВ | 0,187 | 74 | 0,0003 | 0,1822 | 59,5 | 0,00005 | 0,183 | 52,7 | 0,0001 | |
| | П | 0,179 | 61,5 | 0,0008 | 0,1748 | 44 | 0,00037 | 0,173 | 44 | 0,0003 | |
| 4 | МВ | 0,176 | 81,5 | 0,0003 | 0,1685 | 68,5 | 0,00017 | 0,172 | 58 | 0,0001 | |
| | П | 0,171 | 71,5 | 0,0005 | 0,1649 | 49,5 | 0,00018 | 0,168 | 42,7 | 0,0001 | |
| 5 | МВ | 0,165 | 71 | 0,0006 | 0,1642 | 72,5 | 0,00007 | 0,165 | 65,7 | 0,0003 | |
| | П | 0,161 | 66,5 | 0,0004 | 0,1608 | 61 | 0,00017 | 0,157 | 51 | 0,0003 | |
| 6 | МВ | 0,154 | 81,5 | 0,0007 | 0,1547 | 63 | 0,00061 | 0,155 | 57,7 | 0,0002 | |
| | П | 0,15 | 69,5 | 0,0004 | 0,1504 | 54,5 | 0,00022 | 0,145 | 61 | 0,0003 | |
| 7 | МВ | 0,144 | 80,5 | 0,0006 | 0,1480 | 68 | 0,00024 | 0,144 | 63,3 | 0,0001 | |

Табл. 2. Характеристики сушки плотного слоя зерна (овес) при циклическом подводе микроволновой энергии. Продувка слоя воздухом при температуре на входе $t_a = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

| Цикл | Период | u_k , кг/кг | t_{cp} , °C | N , с^{-1} | u_k , кг/кг | t_{cp} , °C | N , с^{-1} |
|------|--------|------------------|------------------|--------------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | МВ | 0,199 | 46 | 0,0001 | 0,199 | 46,00 | 0,0001 |
| | П | 0,196 | 36,33 | 0,0003 | 0,194 | 32,33 | 0,00025 |
| 2 | МВ | 0,195 | 54,33 | 0,0001 | 0,193 | 50,67 | 0,0001 |
| | П | 0,189 | 47 | 0,0006 | 0,185 | 51,67 | 0,0004 |
| 3 | МВ | 0,188 | 68,33 | 0,0001 | 0,1845 | 65,00 | 0,00005 |
| | П | 0,182 | 67 | 0,0006 | 0,174 | 46,00 | 0,00053 |
| 4 | МВ | 0,178 | 72,67 | 0,0004 | 0,1734 | 64,33 | 0,00006 |
| | П | 0,174 | 70,33 | 0,0004 | 0,165 | 64,00 | 0,00042 |
| 5 | МВ | 0,171 | 83,67 | 0,0003 | 0,1646 | 70,67 | 0,00004 |
| | П | 0,163 | 76 | 0,0008 | 0,155 | 64,33 | 0,00048 |
| 6 | МВ | 0,158 | 86,33 | 0,0005 | 0,1536 | 86,00 | 0,00014 |
| | П | 0,153 | 64 | 0,0005 | 0,1435 | 74,33 | 0,00051 |
| 7 | МВ | 0,150 | 95,33 | 0,0003 | 0,1397 | 91,00 | 0,00038 |

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что физическая картина циклической сушки состоит в следующем. После снятия МВ нагрузки и продувки слоя уносится пар из межзернового пространства, а подступившая к поверхности влага частично – испаряется и частично – вновь сорбируется зерновкой. Таким образом, длительность продувки должна быть такой, чтобы вся испарившаяся влага удалялась из межзернового пространства, а релаксационные процессы в зерновках не завершились, что в следующем цикле дает возможность не затрачивать энергию на повторный перенос влаги к поверхности зернови. Это объясняет экспериментальный результат, полученный в данных исследованиях, согласно которому оптимальному режиму циклической сушки соответствует минимальная длительность продувки ненагретым воздухом.

Табл. 3. Сравнительные характеристики циклической сушки при различных входных температурах воздуха и длительности продувки

| t_b , °C | 20 | | | 50 | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| τ_{prod} , °C | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 |
| Удельные затраты энергии Q_{yo} , МДж/кг | 9,07 | 9,68 | 8,96 | 11,72 | 14,33 |
| Средняя скорость сушки N_{cp} , с^{-1} | 0,00043 | 0,000274 | 0,000224 | 0,00038 | 0,000316 |
| Средняя скорость МВ сушки N_{MB} , с^{-1} | 0,000343 | 0,000201 | 0,000157 | 0,00025 | 0,000124 |
| Средняя скорость за периоды продувки N_{prod} , с^{-1} | 0,000483 | 0,000278 | 0,000233 | 0,000533 | 0,000432 |

На рис. 2 приведены результаты расчетов скорости сушки для различных периодов. Анализ данных приводит к выводу, что при продувке как нагретым, так и ненагретым воздухом, вначале скорость сушки выше в периоды продувки, а в конце – значительно усиливается скорость сушки в периоды МВ нагрева, причем для ненагретого воздуха скорость МВ сушки становится больше, чем в периоды продувки. При использовании нагретого воздуха температура материала в конце эксперимента была выше на 10...20 °C по сравнению с ненагретым. Результаты экспе-

риментов показывают, что на значение скорости сушки в периоды МВ нагрева и в периоды продувки оказывает влияние температура материала и его влагосодержание. С увеличением τ_{prod} от 10 с до 20 с (рис. 2) скорость сушки снижается для всех периодов, что говорит об общей нерациональности увеличения длительности продувки. При времени 80 с (рис. 2, а) и 150 с (рис. 2, б), что соответствует четвертому циклу для $\tau_{prod} = 10$ с и пятому для $\tau_{prod} = 20$ с, и далее, отмечается существенное превышение скорости МВ сушки в сравнении со скоростью в перио-

ды продувки. При этом, как видно из табл. 1, для данных, полученных при $\tau_{\text{прод}} = 20$ с, этот цикл характеризуется более низкими значениями температур и влагосодержания по сравнению с данными, полученными при $\tau_{\text{прод}} = 10$ с.

В период продувки нагретым воздухом скорость сушки всегда была выше (рис. 3), однако

после четвертого цикла для $\tau_{\text{прод}} = 10$ с и пятого – для $\tau_{\text{прод}} = 20$ с начинает увеличиваться вклад МВ сушки. Как и при продувке воздухом без подогрева, при $\tau_{\text{прод}} = 20$ с граничный цикл характеризуется более низкими значениями температур и влагосодержания по сравнению с данными, полученными при $\tau_{\text{прод}} = 10$ с (табл. 2).

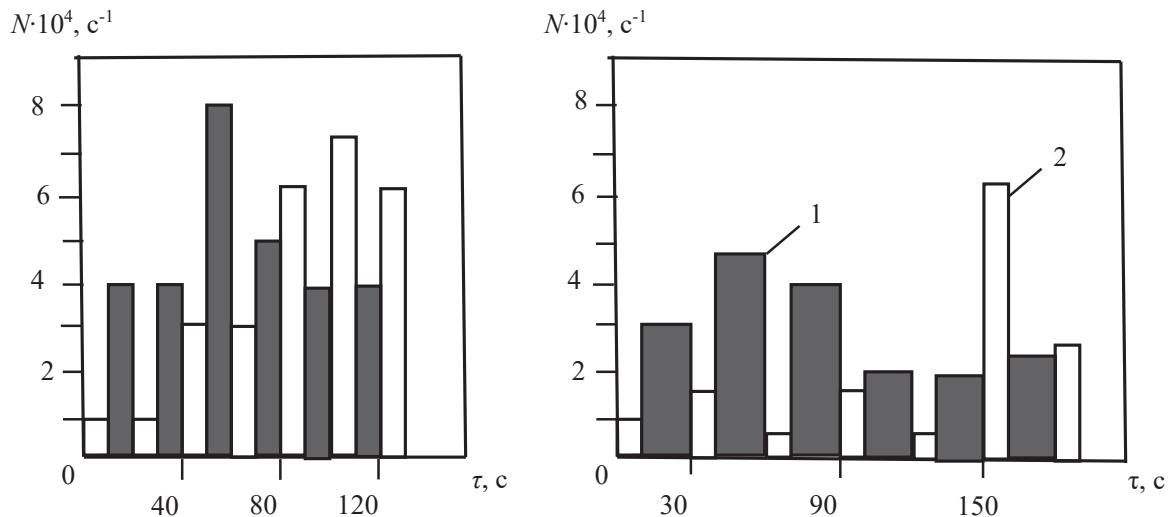


Рис. 2. Зависимость скорости циклической сушки плотного слоя зерна от времени при продувке воздухом без предварительного подогрева:

1 – период продувки, 2 – период МВ нагрева. Длительность МВ нагрева – 10 с.
 $a - \tau_{\text{прод}} = 10$ с, $b - \tau_{\text{прод}} = 20$ с.

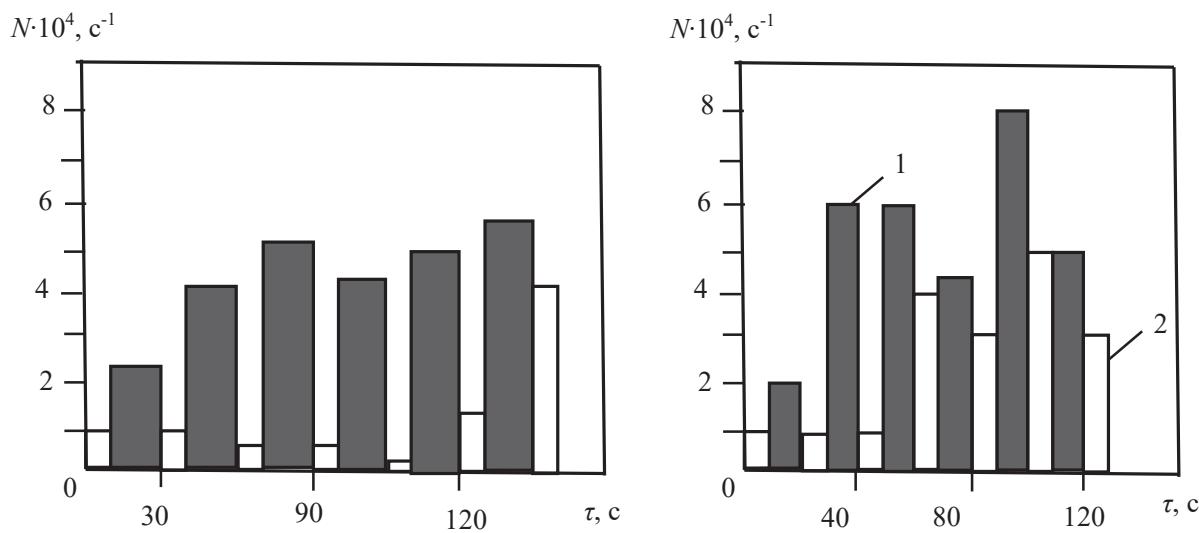


Рис. 3. Зависимость скорости циклической сушки плотного слоя зерна от времени при продувке воздухом с температурой на входе 50 °C:

1 – период продувки, 2 – период МВ нагрева. Длительность МВ нагрева – 10 с.
 $a - \tau_{\text{прод}} = 10$ с, $b - \tau_{\text{прод}} = 20$ с.

Количественной зависимости скорости циклической сушки от значений влагосодержания и температуры слоя на данном этапе определить не удалось. Тем не менее, полученные данные свидетельствуют о существенном перераспределении вклада продувки и МВ нагрева в процессе сушки и позволяют предположить, что существует возможность управления путем изменения соотношения периодов продувка-МВ нагрев.

Получено, что варьированием длительностью периодов МВ нагрева и продувки достигается возможность установления интенсивного и энергоэффективного режима сушки. Для получения более полной информации о рациональных режимах сушки, использующей микроволновой нагрев, целесообразно установить изменение основных характеристик процесса по времени для одновременной микроволново-конвективной сушки и провести сопоставительный анализ результатов.

Выводы

1. Оптимальному режиму циклической микроволновой сушки соответствует минимальная из ряда исследованных длительность продувки слоя зерна (10 с) воздухом без его предварительного подогрева.

2. Скорость сушки в первой части процесса всегда выше в периоды продувки, во второй части значительно усиливается скорость в период МВ нагрева, причем для воздуха без предварительного подогрева скорость МВ сушки становится выше, чем в периоды продувки. На значение скорости сушки в периоды МВ нагрева и в периоды продувки оказывает влияние температура материала и его влагосодержание.

3. Температура слоя зерна при микроволновом нагреве является главным определяющим

фактором, влияющим на скорость сушки. Варьированием длительностью периодов МВ нагрева и продувки достигается возможность установления интенсивного и энергоэффективного режима сушки. Представляется целесообразным установить экспериментальным путем изменение основных характеристик процесса по времени для одновременной микроволново-конвективной сушки и провести сопоставительный анализ результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Advances in Bioprocessing Engineering /* Editors H. Yang, J. Tang. London. *Advances in Agricultural Science and Technology.* Vol. 1. Editors H. Yang, J. Tang. London: World Scientific, 2002. – 172 p.
2. Календарьян В. А., Бонкова И.Л., Волгушева Н.В. Кинетика микроволновой сушки сыпучего органического материала // ИФЖ, 2006. – №3, Т.79. – С. 123–127.
3. Бонкова И.Л., Волгушева Н.В., Дементьевна Т.Ю. Развитие энергосберегающей сушилки для зерна на основе микроволнового подогрева // ТЭПРБП: Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 2013. – С. 365–368.
4. Волгушева Н.В. Кінетика сушіння щільного шару дисперсного матеріалу (на прикладі гречки) при різних способах підведення теплоти / Автореф. дис. канд. техн. наук. /Одеса: ОДАХ, 2005. – 18 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472с.
6. Дементьєва Т. Ю. Інтенсифікація процесів тепловологопереносу при сушінні зернового матеріалу з застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля / Автореф. дис. канд. техн. наук /Одеса: ОДАХ, 2012. – 22 с.

CYCLIC MICROWAVE DRYING DENSE LAYER OF GRAIN MATERIALS

Boshkova I.L., Volgusheva N.V.

Odessa national academy of food technologies,
Dvoryanskaya 1/5, Odessa 65082, Ukraine

The results of experimental studies of drying dense layer grain under the cyclical supply to microwave energy for different exposition and at different inlet air temperature are presented. It has found that drying without preheating is optimal. A physical picture cyclic drying, which explains the experimental result, according to which the optimal regime corresponds to the minimum duration of the purge air out of the test series, is formulated. It has shown that the drying rate significantly redistribute between periods during the whole process, and speed microwave drying becomes higher in the final stage than in the purge period for the air without preheating.

References 6, tables 3, figures 3.

Key words: drying , grain, dense layer, efficiency, a microwave energy supply

1. *Advances in Bioprocessing Engineering /*
Editors H. Yang, J. Tang. London. Advances in Agricultural Science and Technology. Vol. 1. Editors H. Yang, J. Tang. London: World Scientific, 2002. – 172 p.

2. *Kalenderyan V.A., Boshkova I.L., Volgusheva N.V.*
Kinetics of Microwave Drying of a Free-Flowing Organic Material // IFZh, 2006 – P. 123–127 (Rus).

3. *Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Dementeva T.Yu.*
The development of energy-saving grain dryers based on microwave heating // TEPRBP: Yuzhno-Uralskiy gos. un-t. – Chelyabinsk, 2013 – P. 368–368 (Rus).

4. *Volgusheva N.V.* Kinetics drying dense bed of particulate material (for example buckwheat) for various methods for supplying heat / Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. /Odesa: ODAH, 2005. – 18p. (Ukr).

5. *Lyikov A.V.* Theory of Drying. – M.: Energiya, 1968. – 472p. (Rus).

6. *Dementeva T. Yu.* Intensification of processes of heat and moisture transfer in drying grain material under microwave electromagnetic field / Avtoref. dis. kand. tehn. nauk /Odesa: ODAH, 2012. – 22p. (Ukr).

Получено 03.02.2016
Received 03.02.2016

УДК 621.036.7

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТАНОВКИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОДЫ И ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА КОТЛОАГРЕГАТА

Степанова А.И., канд. техн. наук

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

Показано можливість застосування комплексного підходу, заснованого на використанні методів ексергетичного аналізу та методів теорії лінійних систем, для оцінки працездатності установки, що включає котел та комбіновану теплоутилізаційну систему для підігрівання води та дуттєвого повітря.

Библ. 10, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: теплоутилизационная установка, эксергетические потери, матричные балансы.

E – эксергетическая мощность;

Q – тепловая мощность;

t – температура;

W – энергия;

$\eta_{\text{вх}}$ – эксергетический КПД.

Индексы верхние:

и – источник;

пр – продукт;

уст – установка;

т.с. – теплоутилизационная система.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной параметры;

о – окружающая среда;

пот – потери.

Одним из ключевых направлений энергосбережения в теплоэнергетике является повышение эффективности использования топлива в котлоагрегатах путем глубокой утилизации теплоты отходящих газов. Известные теплоутилизационные технологии для котлов малой мощности (до 30 МВт) в номинальном режиме работы котлоагрегата обеспечивают снижение температуры отходящих газов от 170 °C до 70...80 °C, т.е. до температуры начала конденсации водяных паров на теплообменных поверхностях. Такой температурный уровень уходящих газов в большинстве случаев отвечает увеличению КПД котла на 2...4 %. Дальнейшее повышение КПД котла (до 13,8 %) возможно за счет более глубокого охлаж-

дения отходящих газов, т.е. при работе теплоутилизационного оборудования в конденсационном режиме. При этом использование утилизированной теплоты при относительно небольших нагрузках котла только для подогрева обратной теплосетевой воды реализует конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования лишь в осенне-весенний период. Обеспечить такой режим на протяжении всего отопительного периода возможно в том случае, если в теплоутилизационной системе после водогрейного теплоутилизатора, предназначенного для подогрева обратной теплосетевой воды, установить еще один теплообменник, в котором происходил бы подогрев теплоносителей более низкой температуры,

чем обратная вода теплосети. Такими теплоносителями могут служить, например, добавочная вода, поступающая в систему химводоочистки, дутьевой воздух и др. На рис. 1 приведена схема

установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха.

В такой комбинированной установке

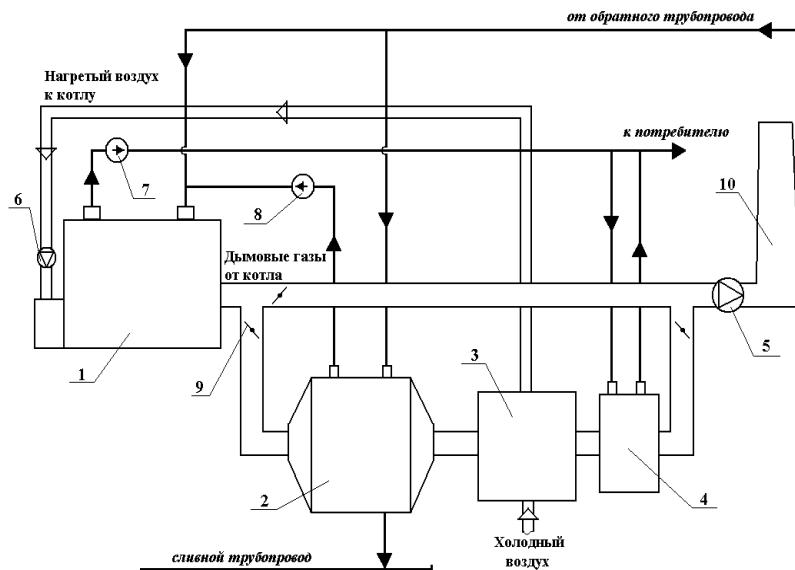


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухо-грейный теплоутилизаторы; 4 – газодогреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы.

благодаря совместному использованию водо-и воздухогрейного теплоутилизаторов обеспечивается конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования на протяжении всего отопительного сезона. Так в холодный период года (при $t_o < 0^{\circ}\text{C}$) глубокая утилизация теплоты дымовых газов может быть реализована преимущественно за счет подогрева холодного воздуха, а в осенне-весенное время (при $t_o > 0^{\circ}\text{C}$) – преимущественно за счет подогрева воды более низкой температуры ($t < 50^{\circ}\text{C}$) в обратной магистрали котельной [1,2].

Анализ эффективности и оптимизация энергетических установок, в которых число технологических процессов и элементов оборудования достаточно велико, существенно затруднены. В связи с этим важно найти подходы, позволяющие количественно оценивать их работоспособность. Комплексные методы, сочетающие элементы эксергетического анализа со статистическими методами планирования эксперимента, методами теории линейных систем, со структурными

и структурно-вариантными методами, методами многоуровневой оптимизации позволяют проводить анализ эффективности и оптимизацию сложных комбинированных теплоутилизационных установок. [3-5]. Сравнительный анализ этих методов дает возможность выбирать для определенного типа установок методы исследования эффективности и оптимизации, обеспечивающие получение таких параметров установок, при которых их эффективность максимальна.

В данной работе рассматривается возможность применения к оценке работоспособности установки, включающей указанную комбинированную теплоутилизационную систему, комплексного подхода, основанного на сочетании методов эксергетического анализа с одним из методов теории линейных систем, методом RP-представления термодинамических балансов системы в матричной форме [6-10].

Цель работы – оценка суммарных эксергетических потерь установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную си-

систему для подогрева воды и дутьевого воздуха, и относительного вклада каждого элемента теплоутилизационной системы в ее необратимость.

Для реализации указанного комплексного подхода записаны балансы массы, энергии и эксергии исследуемой установки в матричной форме:

$$AmM = 0, \quad (1)$$

$$AW = 0, \quad (2)$$

$$AE = E_{\text{пот.}} \quad (3)$$

Здесь Am – 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 $E_{\text{пот.}}$ характеризуют потерю эксергии в i -том элементе исследуемой установки.

Метод RP -представления термодинамических балансов предполагает, что полная входная

матрица A состоит из двух матриц: матрицы источников AR и матрицы продуктов AP . Первая дает потоки, которые служат источниками для любого элемента системы, вторая – потоки, генерируемые в любом элементе системы. Эти матрицы обладают следующими фундаментальными свойствами:

$$A = AR - AP, \quad (4)$$

$$AR E = R, \quad (5)$$

$$AP E = P, \quad (6)$$

$$R - P = E_{\text{пот.}} \quad (7)$$

Здесь R и P – векторы (столбцы), содержащие эксергии источников и продуктов соответственно.

Исследуемая установка представлена в виде структурной схемы, в которой идентифицированы все термодинамические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры (рис. 2).

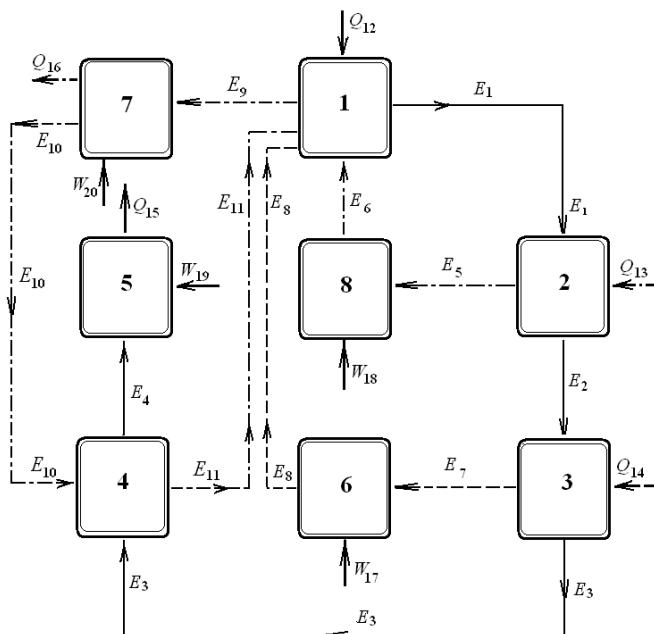


Рис. 2. Структурная схема установки: 1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 4 – газоподреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы; —→ – дымовые газы, - - - → – воздух, - - - → – вода; $E_1 - E_{16}$ – эксергетические потоки; $Q_{12} - Q_{16}$ – тепловые потоки; $W_{17} - W_{20}$ – энергетические потоки.

В соответствии с методом RP -представления термодинамических балансов в матричной форме все термодинамические балансы и термодинамические потоки исследуемой установки рассмо-

трены в системе источник–продукт. Установлены типы термодинамических потоков: потоки, которые служат источниками для любого элемента установки, и потоки, генерируемые в элементах.

Тип термодинамического потока определяет значение элемента в матрице (0, +1 или -1).

Так при построении матрицы источников A_R элемент матрицы с индексами i, j , будет равен +1, если j -й поток поступает в i -й элемент установки, и -1, если j -й поток вытекает из i -го элемента установки; данный элемент матрицы будет равен нулю, если j -й поток пропускает i -й элемент. При построении матрицы продуктов A_P элемент матрицы с индексами i, j , будет равен +1, если j -й поток, являющийся продуктом, генерируемым в i -м элементе установки, выходит из

него, и -1 если j -й поток, являющийся продуктом, генерируемым в другом элементе установки, входит в i -й элемент установки. Матрицы строятся таким образом, что их столбцы соответствуют потокам массы, энергии и эксергии, а строки – соответствующим элементам установки.

В табл. 1 представлены результаты анализа, проведенного в соответствии со структурной схемой исследуемой установки для определения характеристик потоков и соответствующих элементов матриц.

Построены матрицы, с помощью которых

Табл. 1. Характеристики потоков установки

| № элем. | Элемент установки | № потока | E , кВт | Тип потока | Вход, выход | Элемент в матрице | Тип линии передачи |
|---------|--------------------------------|----------|-----------|------------|-------------|-------------------|--------------------|
| 1 | Котел | 1 | 9,89 | продукт | выход | +1 | продукт |
| | | 6 | 228,30 | продукт | вход | -1 | |
| | | 8 | 0,23 | продукт | вход | -1 | |
| | | 9 | 456,00 | продукт | выход | +1 | |
| | | 11 | 11,91 | продукт | вход | -1 | |
| | | 12 | 1207,50 | источник | вход | +1 | |
| 2 | Теплоутилизатор водогрейный | 1 | 9,89 | источник | вход | +1 | источник |
| | | 2 | 2,55 | источник | выход | -1 | |
| | | 5 | 227,90 | продукт | выход | +1 | |
| | | 13 | 221,30 | источник | вход | +1 | |
| 3 | Теплоутилизатор воздухогрейный | 2 | 2,55 | источник | вход | +1 | источник |
| | | 3 | 1,49 | источник | выход | -1 | |
| | | 7 | 0,10 | продукт | выход | +1 | |
| | | 14 | 0 | источник | вход | +1 | |
| 4 | Газонагреватель | 3 | 1,49 | источник | вход | +1 | источник |
| | | 4 | 2,00 | источник | выход | -1 | |
| | | 10 | 12,94 | источник | вход | +1 | |
| | | 11 | 11,91 | продукт | выход | +1 | |
| 5 | Дымосос | 4 | 2,00 | продукт | вход | -1 | продукт |
| | | 15 | 2,29 | продукт | выход | +1 | |
| | | 19 | 3,00 | источник | вход | +1 | |
| 6 | Вентилятор | 7 | 0,10 | продукт | вход | -1 | продукт |
| | | 8 | 0,23 | продукт | выход | +1 | |
| | | 17 | 1,00 | источник | вход | +1 | |
| 7 | Насос | 9 | 456,00 | продукт | вход | -1 | продукт |
| | | 10 | 12,94 | продукт | выход | +1 | |
| | | 16 | 450,70 | продукт | выход | +1 | |
| | | 20 | 10,00 | источник | вход | +1 | |
| 8 | Насос | 5 | 227,90 | продукт | вход | -1 | продукт |
| | | 6 | 228,30 | продукт | выход | +1 | |
| | | 18 | 2,00 | источник | вход | +1 | |

рассчитана степень необратимости процессов в установке, проведен сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных ее элементах и для теплоутилизационной системы определен относительный вклад каждого ее эле-

мента в суммарную необратимость.

Матрица источников A_R , матрица продуктов A_P и полная входная матрица A имеют следующий вид:

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

В построенных матрицах ряды соответствуют элементам установки, а столбцы – эксергетическим потокам, обмениваемому теплу и потребляемой энергии. Размер этих матриц – (8×20) – 8 элементов установки, 11 эксергетических потоков массы, 5 тепловых потоков и 4 рабочих взаимодействия (потребление энергии). Поскольку построенная входная матрица A не является квадратной, приведенный выше баланс дает 8 уравнений с 20 неизвестными. Поэтому построена матрицу A_α размером (12×20) , которая определяется из дополнительных условий, учитывающих следующие факторы.

1. Эксергию вводимых в установку потоков.
2. Наличие внутренних ветвлений в каждом элементе установки.
3. Наличие остатков и побочных продуктов.

Установлены типы ветвлений, а именно, уточнен тот факт, является ли данная ветвь источником или каналом отвода продукта. Рассчитаны

исходные значения термодинамических характеристик потоков (табл. 1). Построена отвечающая указанным критериям матрица ветвлений A_α , имеющая размер (12×20) , в которой использованы результаты расчета эксергетической мощности потоков E (табл. 1). Ряды матрицы – равные нулю элементы, кроме следующих: для входов и побочных продуктов в столбцах, отвечающих соответствующим потокам, будет стоять значение +1, для остатков – -1, для ветвлений – $-x_{ij}$ в столбце j и +1 в столбце i . Дополнительно определялся вектор (столбец) ω размером (12×1) , который включал в себя следующие элементы: для входов $E_i = \omega_{ei}$; для побочных продуктов $E_i = \omega_{si}$; для остатков $E_i = \omega_{ri}$; для ветвлений $E_i = 0$.

$$x_5 = E_2/E_5, x_6 = E_{11}/E_6, x_7 = E_3/E_7; x_{10} = E_{16}/E_{10}. \quad (8)$$

Тогда расширенная входная матрица имеет вид:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} A \\ A_\alpha \end{bmatrix}, (20 \times 20). \quad (9)$$

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Полная система уравнений для определения эксергии E записывается в матричном виде следующим образом:

$$\Lambda E = \Omega, \quad (10)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (20 \times 1)$$

После определения входных матриц для рас-

матриваемых установок была построена диагональная матрица A_k , размером (8×8) , элементы которой k включают эксергию источников E^u и эксергию продуктов E^{np} :

$$k = 1/\eta_{ex} = E^u/E^{np}, \quad (12)$$

а также входная матрица эксергетического КПД J :

$$J = A_u - A_k F_{np}. \quad (13)$$

$$J = \begin{bmatrix} -k_1 0 & 0 & 0 & k_1 0 & k_1 -k_1 0 & k_1 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - k_2 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - k_3 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - k_4 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_5 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 - k_6 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 - k_7 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 - k_8 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для построения указанной матрицы параметры k_i находились следующим образом.

Если элемент установки имел несколько входов и выходов, то:

для линии передачи продукта:

$$k_i = \sum_i E_{bx,i}^u / \left(\sum_h E_{bx,h}^{np} - \sum_l E_{bx,l}^{np} \right) \quad (14)$$

для источниковой линии:

$$k_i = \left(\sum_i E_{bx,i}^u - \sum_j E_{bx,j}^u \right) / \sum_h E_{bx,h}^{np} \quad (15)$$

Тогда, с учетом результатов, представленных в табл. 1, для каждого потока в исследуемой установке рассчитаны значения параметров k_i в

матрице J :

$$k_1 = E_{12}/(E_1 + E_9 - E_6 - E_{11} - E_8); \quad k_2 = (E_1 + E_{13} - E_2)/E_5;$$

$$k_3 = (E_2 + E_{14} - E_3)/E_7; \quad k_4 = (E_3 + E_{10} - E_4)/E_{11}; \quad (16)$$

$$k_5 = E_{19}/(E_{15} - E_4); \quad k_6 = E_{17}/(E_8 - E_7);$$

$$k_7 = E_{20}/(E_{10} + E_{16} - E_9); \quad k_8 = E_{18}/(E_6 - E_5);$$

Расширенная входная матрица эксергетического КПД имеет вид:

$$J_c = \begin{bmatrix} J \\ A_\alpha \end{bmatrix}, \quad (20 \times 20). \quad (17)$$

Можно показать, что:

$$J_c E = \Omega,$$

$$E = J_c^{-1} \Omega.$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, (20 \times 1). \quad (18)$$

С помощью матрицы J_C^{-1} , обратной матрице J_C , а также уравнений (18) можно определить эксергию каждого потока как функцию КПД элементов оборудования, ветвей и внешних источников, передающих энергию системе.

Далее приведены некоторые результаты проведенных исследований на основе методов эксергетического анализа и метода RP-представления термодинамических балансов. Вектор-столбец потерь эксергетической мощности имеет вид:

$$E_{\text{пот}} = \begin{bmatrix} 982,05 \\ 0,74 \\ 0,96 \\ 0,51 \\ 2,71 \\ 0,88 \\ 2,36 \\ 1,60 \end{bmatrix}$$

Сумма элементов этого столбца даёт полную потерю эксергии установкой в целом. Сопоставляя значения $E_{\text{пот},i}$ между собой и сравнивая их с суммарным значением $E_{\text{пот}}$, можно получить представление об относительном вкладе каждого элемента в суммарную необратимость установ-

ки. Рассчитана степень необратимости процессов в теплоутилизационной установке, проведен сравнительный анализ потерь эксергии в различных элементах и определен относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость системы. Суммарные потери эксергетической мощности в установке и потери эксергетической мощности в теплоутилизационной системе составляют:

$$E_{\text{пот}}^{\text{уст}} = \sum_{i=1}^7 E_{\text{пот},i} = 991,80 \text{kBt}; \quad E_{\text{пот}}^{\text{т.с.}} = \sum_{i=2}^7 E_{\text{пот},i} = 9,76 \text{kBt}.$$

На рис. 2 представлены результаты исследований потерь эксергетической мощности на основе RP-представления термодинамических балансов.

Как видно из рис. 2 наибольшие потери эксергетической мощности происходят в теплонасосной системе. С учетом этого вывода в схеме установки проведены соответствующие изменения.

Таким образом, применение к термодинамическим балансам теории линейных систем в сочетании с методами эксергетического анализа позволяет определить в непосредственном виде полную необратимость установки, ее эксергетические характеристики и потерю эксергетической мощности каждым элементом установки. Это позволяет считать, что приведенную выше методику, сочетающую метод RP-представления термодинамических балансов в матричной форме и методы эксергетического анализа можно

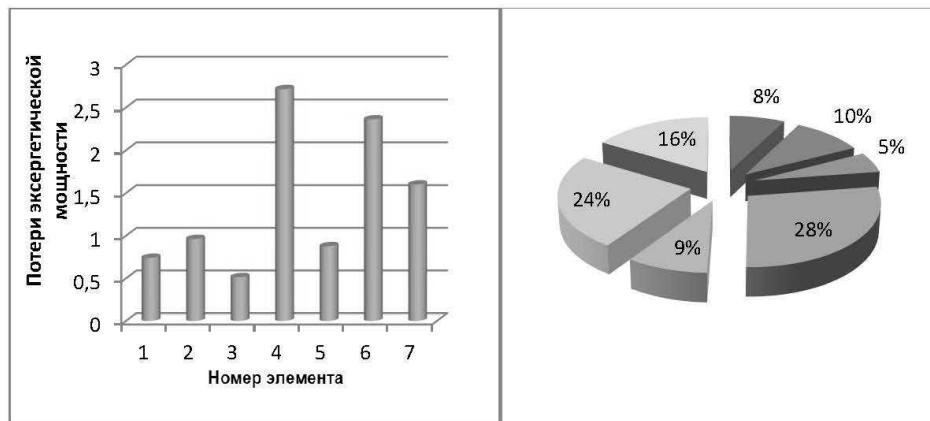


Рис. 3. Потери эксергетической мощности $E_{\text{пот}}$ (кВт) в элементах теплоутилизационной системы и относительный вклад каждого элемента в общие потери эксергетической мощности теплоутилизационной системы:

1 – теплоутилизатор водогрейный; 2 – теплоутилизатор воздухогрейный; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6,7 – насосы.

применять для оценки работоспособности сложных теплоутилизационных систем.

Выводы

1. Проанализирована возможность применения комплексного подхода, основанного на использовании методов эксергетического анализа совместно с методами теории линейных систем, для оценки работоспособности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха.
2. На основе RP-представления термодинамических балансов построены соответствующие матрицы, с использованием которых рассчитаны потери эксергетической мощности в различных элементах установки, определены общие потери эксергетической мощности теплоутилизационной системы и относительный вклад каждого ее элемента в суммарную необратимость.

3. Установлено, что наибольшие потери эксергетической мощности происходят в теплонасосной системе. С учетом этого вывода в схеме установки проведены соответствующие изменения.

3. Показано, что методика RP-представления термодинамических балансов в сочетании с эксергетическими методами успешно реализуется для оценки работы сложных теплоутилизационных систем и может служить инструментом моделирования в них тепловых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.

2. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Эффективность агрегатированных теплоутилизационных систем для котельных с поверхностными конденсационными теплоутилизаторами. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 63–71.
3. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 41-46.
4. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 81-88.
5. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А. Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата. // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 71-79.
6. Valero A., Torres C. Algebraic .Thermodynamic Analysis of Energy Systems ASME Book no. G00452 WAM-1988, AES. Vol. 7 P. 13 – 23.
7. Pardo E.D. Analisis Exergético y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid: –1991. – 238р.
8. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics Wiley & Sons. N V.–1988. – 276p.
9. Alvarado S., Cherardelli C. Exergoeconomie Optimization of Cogeneration Plant. Energy, (19 – 12). 1994. – 124p.
10. Auracher H. Fundamental Aspects of Energy Application to the Analysis and Optimization of Energy Processes. – 2006. – 165p.

**ANALYSIS OF THE APPLICATION
COMBINED HEAT RECOVERY SYSTEMS
FOR WATER HEATING AND BLAST AIR OF
THE BOILER UNIT**

Stepanova A.

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

The possibility of using an integrated approach based on the use of methods of exergy analysis in conjunction with the methods of the theory of linear systems to evaluate your installation, including boiler and a combined heat and the utilization system to heat the water and blow air. Using RP-representation of thermodynamic balance respectively corresponding matrix on which a comparative analysis of exergy losses in the various elements of the power plant defines the general exergy loss of power and the relative contribution of each element in the total irreversibility of the installation.

References 10, tables 1, figures 3.

Key words: heat recovery units, exergetic losses matrix balances.

1. Dolinsky A., Fialko N., Navrodska R., Gnedash G. Basic principles of heat recovery technologies for boilers of small power. // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2014. – V. 36, №4. – P. 27 – 34. (Rus.)
2. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky Y., Shevchuk S. Effectiveness

of termoutilizing systems of boiler plants, using surface condensing utilizers. // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2014. – V. 36, № 3. – P. 63 – 71. (Rus.)

3. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky Y. The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods. // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2014. – V. 36, № 1. – P. 41 – 46. (Rus.).

4. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Sherenkovsky Y. Optimization of heat recovery installation glass furnace. // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2014. – V. 36, № 5. – P. 81 – 88. (Rus.)

5. Fialko N., Stepanova A., Presitsh G., Gnedash G. Analysis of efficiency heat recovery systems for heating and humidifying the air blast boiler. // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2015. – V. 37, № 4. – P. 71 – 79. (Rus.).

6. Valero A., Torres C. Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems ASME Book no. G00452 WAM-1988, AES. Vol. 7 P. 13 – 23.

7. Pardo E.D. Analisis Exergético y Termoeconómico de Procesos industriales. Madrid: –1991. – 238p.

8. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics Wiley & Sons. N V. –1988. – 276p.

9. Alvarado S., Cherardelli C. Exergoeconomie Optimization of Cogeneration Plant. Energy, (19 – 12). 1994. – 124p.

10. Auracher H. Fundamental Aspects of Energy Application to the Analysis and Optimization of Energy Processes. – 2006. – 165p.

Получено 11.05.2015
Received 11.05.2015

УДК 621.039.5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Авраменко А.А., член-корреспондент НАН Украины, Ковецкая М.М., к.т.н.,
Кравчук А.В., Ковецкая Ю.Ю.

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

Представлено огляд перспективних технологій ядерних енергетичних установок для розв'язання задач підвищення безпеки і економічної ефективності. Показана роль теплофізичних досліджень для удосконалення легководних ядерних реакторів.

Библ. 54, табл. 5.

Ключевые слова: ядерные реакторы нового поколения, гелиевый теплоноситель, вода сверхкритического давления, теплофизические исследования.

ВВЭР – водо-водянной энергетический реактор;

ВБЭР – водяной блочного энергетический реактор;

ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый

Представлен обзор перспективных технологий ядерных энергетических установок для решения задач повышения безопасности и экономической эффективности. Показана роль теплофизических исследований для совершенствования легководных ядерных реакторов.

A review of perspective nuclear power technologies is presented for solving the problems of improving the safety and economic efficiency. A role of thermal physical investigation for improving light-water reactors is shown.

реактор;

СКД – сверхкритическое давление;

твэл – тепловыделяющий элемент.

Введение

Состояние и перспективы развития технологий ядерных энергетических установок в странах мира постоянно анализируются и отражаются в многочисленных публикациях, например в [1–6]. Создаются международные проекты по разработке перспективных ядерных энергетических систем, включая как ядерные реакторы, так и топливные циклы. Так международная программа GIF IY (Generation IY International Forum) функционирует с 2001 г. и направлена на разработку ядерных энергетических систем четвертого поколения с высокими эксплуатационными характеристиками, повышенной экономичностью и безопасностью.

МАГАТЭ осуществило международный проект INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) по разработке ядерных реакторов и топливных циклов, который направлен на создание критерии выбора различных инновационных технологий исходя из

требований пользователей.

Каждая страна выбирает свое направление развития атомной энергетики на основе прогнозов экономического развития и исходя из принципов безопасности, конкурентоспособности, наличия или доступности топливных ресурсов, способа утилизации ядерных отходов, нераспространения ядерного оружия.

Наиболее важными задачами ядерной энергетики XXI века по мнению авторов работы [7] являются:

- создание замкнутого топливного цикла с расширенным воспроизводством и повторным использованием плутония и ^{233}U :

- безопасное обращение с радиоактивными отходами, включая создание хранилищ отработанного ядерного топлива;

- создание эффективного реактора-размножителя, ядерных энергетических установок для теплоснабжения и технологических производств.

Украина окончательно не определилась с

выбором своего ядерного топливного цикла [8]. Согласно «Энергетической стратегии Украины до 2030 г.» основное внимание будет уделяться продлению срока эксплуатации действующих энергоблоков, исчерпавших свой проектный ресурс. Предполагается также строительство новых энергоблоков с легководными реакторами поколения III⁺. В работе [8] определены задачи, стоящие перед Украиной по созданию ядерного топливного цикла и в частности отмечается, что для эффективного использования продуктов отработанного ядерного топлива, в структуре ядерной энергетики должны быть реакторы как на тепловых, так и на быстрых нейтронах.

Программа GIF IY

В 70-е годы прошлого столетия в ядерной технологии было введено понятие «внутренне присущей безопасности», предусматривающее максимальное использование присущих ядерному топливу, теплоносителю, радиоактивным отходам и другим компонентам фундаментальных физических и химических свойств и закономерностей.

Такой подход позволяет достичь высокой безопасности ядерного объекта не усложнением, а упрощением конструкций.

В рамках программы GIF IY были выбраны шесть инновационных ядерных реакторов, которые могут быть введены в эксплуатацию до 2030 г. [9–12]:

- быстрый реактор с газовым (гелиевым) теплоносителем GFR (Gas Fast Reactor) с замкнутым топливным циклом;
- высокотемпературный реактор с гелиевым теплоносителем и графитовым замедлителем VHTR (Very High Temperature Reactor);
- реактор с водой сверхкритических параметров SCWR (Supercritical Water Reactor);
- быстрый реактор с натриевым теплоносителем SFR (Sodium Fast Reactor), замкнутым топливным циклом, эффективным сжиганием актиноидов, воспроизведением топлива на основе урана;
- быстрый реактор со свинцовыми/свинцово-висмутовыми теплоносителями LFR (Lead Fast Reactor), замкнутым топливным циклом, сжиганием актиноидов, эффективным воспроизвед-

ством ядерного топлива.

- реактор на тепловых нейтронах MSR (Molten Salt Reactor) с циркуляцией топлива на основе расплавленных солей, с полной переработкой актиноидов в топливном цикле.

При разработке этих проектов основное внимание уделяется следующим аспектам:

- экономической конкурентоспособности, включая стоимость топливного цикла;
- ужесточению мер по ограничению распространения ядерных оружейных материалов;
- повышению эффективности технологий переработки ядерных отходов;
- повышению степени использования ресурсов ядерного топлива;
- совершенствованию эффективности ядерных технологий.

Среди этих технологий выделяются две технологии производства электроэнергии с КПД 45...47 % использующие высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем и реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления.

Высокотемпературные газовые реакторы (ВТГР)

Разработка ВТГР осуществляется по следующим направлениям: энергоблоки с паровым циклом (температура теплоносителя на выходе 750 °C); с прямым газотурбинным циклом (температура на выходе 850 °C); для получения технологического тепла (температура на выходе 950 °C и более).

Высокий уровень безопасности ВТГР достигается за счет сочетания свойств внутренне присущей безопасности и конструктивных решений:

- гелиевый теплоноситель не влияет на реактивность;
- графит, используемый в качестве замедлителя и конструкционного материала активной зоны, в результате высокой теплоемкости аккумулирует теплоту, выделяемую в топливе;
- топливо на основе микрочастиц с термостойким покрытием надежно удерживает радиоактивные продукты деления;
- отрицательный коэффициент реактивности по температуре способствует уменьшению мощ-

ности реактора при росте температуры теплоносителя.

Проекты высокотемпературных гелиевых реакторов электрической мощностью 1000 МВт для промышленных АЭС разрабатываются в США (HTGR-1160), Германии (THTR-1000), Великобритании (HTGR). Исследования показали, что уровень самозащищенности реактора ВТГР тем выше, чем меньше размер реактора, плотность энерговыделения и температура топлива. В этом случае появляется возможность организовать отвод остаточного тепловыделения

Таблица 1

| Параметры | GFR | VHTR |
|---|---------|----------|
| Тепловая мощность, МВт | 600 | 600 |
| Температура теплоносителя, вход/выход, °C | 790/850 | 640/1000 |
| Давление, МПа | 9 | 7 |
| Массовый расход, кг/с | 320 | 320 |
| Спектр нейтронов | быстрый | тепловой |
| КПД | 48 | >50 |

Реакторы GFR на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем предназначены для эффективного преобразования делящегося урана и сжигания актиноидов, организации пристанционного замкнутого топливного цикла [10]. Реактор VHTR на тепловых нейтронах с гелиевым теплоносителем и уран-плутониевым топливным циклом предназначен для выработки электроэнергии и технологического тепла. В активной зоне реактора могут использоваться как призматические тепловыделяющие сборки, так и шаровая засыпка.

Основными проблемами высокотемператур-

пассивными средствами (естественная конвекция, теплопроводность, излучение). В рамках программы GIF IY разрабатываются проекты быстрых реакторов для производства электроэнергии, решения задач минимизации высокоактивных отходов, производства водорода. В табл. 1 представлены технические параметры реакторов с гелиевым теплоносителем для высокотемпературного термохимического производства, а также выработки электроэнергии, разрабатываемые в США [9]:

Таблица 2

| | PBMR | GT-MHR |
|------------------------------------|---------|---------|
| Тепловая мощность, МВт | 265 | 600 |
| Электрическая мощность, МВт | 117 | 285 |
| КПД, % | 44,2 | 47,5 |
| Температура на входе/выходе, °C | 536/900 | 491/850 |
| Давление, МПа | 7 | 7 |
| Расход гелия, кг/с | 140 | 320 |
| Среднее выгорание топлива, ГВт.с/т | 80 | |

ных реакторов для получения электроэнергии и технологического тепла зарубежные специалисты считают выбор типа твэлов, создание конструкционных материалов для теплообменных и теплотранспортных систем, работающих в условиях очень высоких температур, повышение надежности и безопасности эксплуатации. В Южноафриканской республике разрабатывается модульный реактор PBMR (Particle Bed Modular Reactor) на тепловых нейтронах с гелиевым теплоносителем и насыпной активной зоной. Его основные технические характеристики приведены в табл. 2 [13].

Технологическая схема энергоблока – одноконтурная с прямым газотурбинным циклом Брайтона. Реактор и все системы первого контура размещены в корпусе под давлением, а газовая турбина, электрогенератор, компрессоры и теплообменники – в отдельном блоке. При использовании сферических топливных элементов движение топлива происходит в реакторе под нагрузкой. Таким образом устраняется необходимость в остановках реактора для перегрузок топлива, которые снижают коэффициент использования установленной мощности. Среднее обогащение топлива составляет 5...6 %, а выгорание достигает 80 ГВт.сут/т.

В США осуществляется более крупный проект газотурбинного модульного гелиевого реактора GT-MHR (Gas Turbine – Modular Helium Reactor) электрической мощностью 285 МВт. Технологическая схема энергоблока – одноконтурная с газотурбинным приводом электрогенератора. Технические характеристики GT-MHR приведены в табл. 2.

Существенное преимущество энергоблока – высокий уровень ядерной безопасности. Низкая плотность энерговыделений в активной зоне и конструктивное блочно-модульное исполнение обеспечивают пассивное, без каких либо систем аварийного расхолаживания, рассеивание остаточных тепловыделений в окружающую среду без повреждения твэлов.

В активной зоне GT-MHR может быть использовано топливо на основе урана с применением в качестве делящегося материала оружейного плутония. По мнению американских специалистов выгорание плутония будет достигать 95 %. Это обстоятельство является весьма привлекательным, так как уменьшает опасность распространения ядерного оружия. Проект разрабатывают компания General Atomics (США) в сотрудничестве с Российским Минатомом при поддержке компаний Франции и Японии [14].

Учитывая перспективность высокотемпературных газовых реакторов для производства электроэнергии и высокотехнологического тепла, нами были проведены исследования теплофизических процессов в элементах активной зоны реакторов для оценки их безопасности. Исследованы закономерности и особенности

теплообмена при течении гелия в активной зоне стержневого и насыпного типа. Была усовершенствована трехмерная математическая модель турбулентного тепломассообмена на основе ренормализационно-группового похода для исследования нестационарных процессов и учета эффектов микропористой среды [15,16].

При исследовании гидродинамических и теплообменных процессов в модели активной зоны реактора насыпного типа с шаровыми тепловыделяющими элементами установлена зависимость температуры оболочки твэлов от проницаемости засыпки; получены распределения профилей скорости и температуры в активной зоне в зависимости от проницаемости пористой среды; определены критерии гидродинамической неустойчивости. Полученные результаты могут быть использованы для оценки безопасности высокотемпературных гелиевых реакторов с шаровыми тепловыделяющими элементами.

Исследованы также закономерности гидродинамики и теплообмена в активной зоне высокотемпературных гелиевых реакторов с гексагональными тепловыделяющими сборками стержневого типа. Расчеты проведены для модельной семистержневой тепловыделяющей сборки треугольной упаковки в стационарных и нестационарных режимах. Получены распределения скоростей и температур по ячейкам пучка обогреваемых стержней, определено влияние необогреваемой стенки и межканальных перетечек на параметры теплоносителя. Исследована азимутальная неравномерность температуры обогреваемых стержней и ее зависимость от входных параметров. Минимальные значения коэффициентов теплоотдачи наблюдаются в угловом зазоре между тепловыделяющим стержнем и стенкой [17].

Исследованы нестационарные режимы с уменьшением расхода теплоносителя и скачками тепловой мощности. Показано влияние изменения расхода теплоносителя в тепловыделяющей сборке с учетом поверхностного и объемного тепловыделения на распределение температуры. Определено время достижения температуры стенки обогреваемого стержня предельно допустимого значения [18]. Проанализированы опасные режимы, возникающие при

всплесках мощности. Знание локальных характеристик течения и теплообмена в активной зоне реактора позволяет оценить его надежность и безопасность.

Реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления

Основная задача использования легководных реакторов со сверхкритическим давлением SCWR состоит в том, чтобы повысить экономичность существующих технологий с реакторами PWR (Pressurized Water Reactor). Эта концепция реакторов рассматривается специалистами России, Японии, США, Франции, Канады, Китая и других стран в рамках международных программ по разработке реакторов четвертого поколения. Строительство АЭС с реакторами SCWR позволит повысить КПД установок до 44...48 %, снизить металлоемкость оборудования по сравнению с существующими АЭС с ВВЭР или PWR [19–21]. Рассматриваются концепции реакторов корпусного и канального типа, с тепловым и быстрым спектром нейтронов. Ядерные энергоблоки с реактором SCWR характеризуются следующими особенностями [20]:

- низким расходом теплоносителя и высоким

его подогревом в активной зоне, что позволяет снизить мощность, потребляемую циркуляционными насосами;

- высокой энталпиией теплоносителя, что обеспечивает высокий КПД установки;
- однофазностью теплоносителя, следовательно, отсутствием режимов с кризисом теплообмена;
- реализацией прямоточного цикла, что приводит к компактности реакторной системы;
- возможностью использования технологий и оборудования энергоблоков СКД с органическим топливом.

Возможны варианты компоновки активной зоны с тепловым спектром нейтронов для эксплуатации в открытом топливном цикле с топливом UO_2 и быстрым спектром нейтронов для работы в замкнутом топливном цикле с МОХ-топливом и коэффициентом воспроизводства $K \approx 1$ или выше, до 1,2 [22].

На основании предварительных проектных разработок легководных реакторов со сверхкритическим давлением, выполненных в США, Франции и России в табл. 3 представлены их основные характеристики.

Таблица 3

| Параметр | HPLWR (Франция) | SCWR (США) | ВВЭР-СКД (Россия) |
|---|--------------------|---------------|----------------------|
| Электрическая мощность, МВт | 1000 | 1600 | 1700 |
| Температура теплоносителя, вход/выход, °C | 280/500 | 280/500 | 280/530 |
| Давление теплоносителя, МПа | 25 | 25 | 25 |
| Диаметр и толщина оболочки твэла, мм | 8x0,4 | 10,2x0,63 | 10,7x0,55 |
| Шаг между твэлами, мм | 9,5 | 11,2 | 12,0 |
| Обогащение топлива UO_2 , % | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Среднее выгорание топлива, МВт.сут/кгУ | 45 | 45 | Около 40 |
| Максимальная температура оболочки твэла, °C | Около 670 | | |

Особенности охлаждения активной зоны водой сверхкритических параметров учитываются при формировании спектра нейтронов, анализе безопасности и оценке устойчивости работы реактора. В табл. 4 представлены основные характеристики разрабатываемых в России одноконтурной и двухконтурной реакторных установок

ВВЭР-СКД с естественной (ЕЦ) и принудительной (ПЦ) циркуляцией теплоносителя [23].

В Канаде ведутся разработки усовершенствованных тяжеловодных канальных реакторов CANDU-X (Canada Deuterium Uranium –X) с водой сверхкритических параметров в качестве теплоносителя электрической мощностью от

375 до 1200 МВт (табл. 4) [9]. Предложена новая конструкция топливного канала, в котором замедлитель (тяжелая вода) отделяется от теплоносителя высокого давления циркониевой трубой с внутренним теплоизолирующим слоем.

Проект реактора SCWR на быстрых нейтронах электрической мощностью 700 МВт на суперкритические параметры разработан в Японии [20]. Активная зона рассчитана на высокую плотность энерговыделения при максимальной линейной тепловой нагрузке, не превышающей

39 кВт/м. При расходе теплоносителя 850 кг/с эквивалентный диаметр активной зоны составляет 2,1 м, что значительно меньше, чем у реакторов PWR такой же мощности. Активная зона реактора содержит запальные и бланкетные сборки. Запальные сборки генерируют быстрые нейтроны и служат источником тепловой энергии, бланкетные сборки используются для обеспечения отрицательного пустотного коэффициента реактивности. В табл. 5 представлены расчетные параметры активной зоны реактора SCWR [20].

Таблица 4

| Параметр | ВВЭР-СКД | ВВЭР-СКД | CANDU-X |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Тип установки | Одноконтурная | Двухконтурная | |
| Спектр нейtronов | Тепловой, быстрый | Тепловой | Тепловой |
| Тепловая мощность, МВт | 3700 | 1250 (ЕЦ) 2500(ПЦ) | 2500 |
| Электрическая мощность, МВт | 1700 | 500 (ЕЦ) и 1000 (ПЦ) | 1200 |
| КПД, % | 45 | 43 | 48 |
| Давление, МПа | 24,5 | 24,5 | 25 |
| Температура на входе/ выходе, °C | 290/540 | 390/540 | 350/625 |
| Топливо | UO ₂ , MOX, кермет*) | UO ₂ , MOX | UO ₂ /Th |
| Обогащение, % | до 5 (тепловой), до 20 (быстрый) | | 4 |
| Диаметр твэла, мм | 9...11 | 9...11 | 7 |

*) – керметное топливо с дополнительным барьером для одноконтурной установки

Таблица 5

| Параметры | |
|--|-------|
| Тепловая мощность, МВт | 1650 |
| Электрическая мощность, МВт | 720 |
| Высота активной зоны, см | 300 |
| Эквивалентный диаметр активной зоны, см | 210 |
| Обогащение по делящемуся Ru, масс.% | 24,87 |
| Температура теплоносителя на выходе активной зоны, °C | 503,7 |
| Максимальная температуры поверхности оболочки твэлов, °C | 639,8 |
| Средняя линейная тепловая нагрузка, кВт/м | 17,3 |
| Расход теплоносителя, кг/с | 850,0 |
| Среднее выгорание топлива, МВт.сут/кг ТМ | 69,3 |

При освоении технологии леководных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя необходимо полное понимание теплогидравлических процессов в теплоносителе и решение проблемы создания новых конструкционных материалов активной зоны. В теплофизическому плане одной из важных является проблема определения коэффициента теплоотдачи в активной зоне реактора и безопасной области тепловых нагрузок, чтобы исключить возможность перехода в режим ухудшенного теплообмена. В режиме ухудшенного теплообмена наблюдается резкое снижение коэффициента теплоотдачи с образованием зон перегрева, что может привести к разрушению оболочки тепловыделяющих элементов. Поэтому исследование природы явления ухудшенного теплообмена при переходе от докритических к сверхкритическим параметрам теплоносителя и разработка надежных методов его прогноза важны для обеспечения безопасности реакторной установки.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований природы ухудшенного теплообмена при течении воды СКД в каналах свидетельствует о том, что это явление имеет гидродинамическую природу и связано с существенным изменением структуры как осредненного, так и пульсационного течения [25]. Резкое увеличение теплоемкости и уменьшение плотности среды при приближении к критической температуре вызывает термическое ускорение потока, что приводит к уменьшению турбулентности вблизи стенки. При подъемном течении теплоносителя в трубах профиль скорости приобретает седлообразную форму с максимумом вблизи стенки, где образуется запирающий для переноса теплоты слой. Это приводит к ухудшению теплообмена и резкому повышению температуры стенки. Актуальным является вопрос насколько опасны такие режимы для тепловыделяющих сборок и при каких геометрических и режимных параметрах они возникают.

Экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики в тепловыделяющих сборках с водой сверхкритических параметров очень мало. Для обоснования безопасности таких энергоблоков проводят расчеты возможных аварийных режимов на основе трехмерных ма-

тематических моделей теплообмена и гидродинамики в активной зоне реакторов и одномерных моделей с поканальным (ячейковым) теплогидравлическим расчетом [24].

В работах [15,18,26] представлены результаты численного моделирования теплообмена и гидродинамики при течении воды сверхкритического давления в вертикальной семистержневой тепловыделяющей сборке с параметрами активной зоны ВВЭР-СКД. Численное моделирование течения теплоносителя в сборке выполнено на основе RNG k-ε модели турбулентности, включающей систему уравнений сохранения массы, количества движения, энергии теплоносителя, а также уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии.

Определены локальные характеристики потока в ячейках пучка обогреваемых стержней, изменение температуры стенки и коэффициента теплоотдачи по длине и сечению тепловыделяющей сборки, влияние необогреваемой стенки на характеристики потока, условия возникновения режима ухудшенного теплообмена. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине тепловыделяющей сборки в теплонапряженной точке носит немонотонный характер. Максимум коэффициента теплоотдачи наблюдается в области достижения температуры теплоносителя критического значения. После достижения максимума начинается резкое падение коэффициента теплоотдачи в соответствии с уменьшением теплоемкости и термическим ускорением потока вблизи обогреваемой стенки. В этой области происходит ламинаризация потока, образуется запирающий для переноса теплоты слой и возникает режим ухудшенного теплообмена, характеризующийся ростом температуры стенки. В сечении, где температура теплоносителя достигает критического значения, наблюдается существенная неравномерность коэффициента теплоотдачи по окружности тепловыделяющего элемента.

Исследованы нестационарные режимы, характеризующиеся уменьшением расхода теплоносителя и резким увеличением тепловой мощности. Определены границы области ухудшенного теплообмена и их перемещение в нестационарных режимах. Определены условия, при которых температура стенки тепловыделяющего

элемента достигает предельно допустимого значения.

Ядерные реакторы малой и средней мощности (SMR)

МАГАТЭ отмечает возобновление интереса к реакторам малой и средней мощности SMR (Small and Medium Reactor) для производства электроэнергии, теплоснабжения, орошения морской воды, производства водорода и других технологических процессов [27–31]. По определению МАГАТЭ к реакторам малой мощности относятся реакторы электрической мощностью до 300 МВт, к реакторам средней мощности – реакторы электрической мощностью до 700 МВт. Предпосылками для развития реакторов малой и средней мощности являются следующие факторы:

- повышение надежности и безопасности за счет внутренне присущей безопасности и упрощения конструкции;
- обеспечение масштабного эффекта за счет роста числа модулей, возможность наращивания мощности электростанций по мере потребностей добавлением новых модульных единиц;
- замена устаревших энергоблоков на ископаемом топливе;
- экономическая доступность за счет заводского производства модулей и сокращения сроков строительства энергоблоков;
- привлекательность для энергоснабжения удаленных районов.

Особый интерес инвесторов вызывают малые реакторы модульной конструкции с большой длительностью кампании [30]. Малые габариты и гарантированная безопасность позволяют расположение энергоблоков в границах населенных пунктов на площадках с наземным и подземным размещением. Такие ядерные энергетические установки обеспечивают затрудненный несанкционированный доступ к топливу во время его использования на площадке и транспортирования.

В настоящее время разрабатываются более трех десятков проектов модульных реакторов в разных странах. Большинство из них – с легководным теплоносителем. Из наиболее разработанных отмечаются проекты реактора SMART

(System-integrated Modular Advanced Reactor) (Южная Корея), электрической мощностью 100 МВт, для производства электроэнергии, теплоснабжения и орошения морской воды; ВБЭР-300 (Россия) электрической мощностью 150, 230, 300 МВт (в зависимости от числа петель), для производства электроэнергии и теплоснабжения; Westinghouse SMR (США), электрической мощностью 225 МВт, для замены стареющих генерирующих мощностей, работающих на ископаемом топливе [32]. Ядерная часть энергоблока с реактором Westinghouse SMR и бассейн с отработанным топливом располагаются под землей для защиты от внешних угроз. Заводское изготовление и сборка основного оборудования, сжатые графики строительства обеспечивают минимальные сроки между инвестициями и началом поступления денег от эксплуатации электростанции, что обеспечивает инвестиционную привлекательность проекта.

Проекты энергоблоков с реакторами малой и средней мощности разрабатываются также в Аргентине, Китае, Индии, Пакистане, Японии. Для развитых стран SMR дают возможность соружать их по мере необходимости, для развивающихся стран они могут быть единственным выбором из-за малой мощности электрических сетей. Для Украины также может оказаться перспективным строительство энергоблоков SMR для замещения устаревших угольных энергоблоков и автономных источников производства электроэнергии и тепла для высокотемпературных технологических процессов.

Теплофизические исследования для совершенствования легководных ядерных реакторов

На данном этапе развития ядерной энергетики ставится задача повышения безопасности АЭС и улучшения их экономических и эксплуатационных характеристик путем сочетания свойств самозащищенности и пассивных систем безопасности. Разработка и обоснование таких систем требуют проведения теплофизических исследований работы ЯЭУ в стационарных и нестационарных режимах, включая экспериментальные исследования, разработку и совершенствование методов численного моделирования [33–36]. Работа ядерных энергетических установок ИУ

поколения с высоким уровнем безопасности требует проведения фундаментальных исследований в области теплофизики. Основным направлением научных исследований в области гидродинамики и теплообмена для легководных ядерных реакторов остаются исследования кризиса теплообмена для новых вариантов геометрии тепловыделяющих сборок, нестационарных и аварийных режимов.

Надежно рассчитать гидродинамические процессы можно для однофазного течения теплоносителя. Для двухфазных сред возникают большие трудности с выбором модели турбулентности при расчетах локальных характеристик потока, замыкающих уравнений при расчетах осредненных параметров в нестационарных процессах. До сих пор нет надежных карт режимов двухфазных потоков для разного давления. Карты режимов течения, используемые в компьютерных кодах RELAP, CATHARE, KOPCAB и др., верифицированы экспериментальными данными для газожидкостных и пароводяных потоков низкого давления [36].

Для проектирования наиболее теплонапряженных областей активной зоны реакторов, парогенераторов и теплобменников необходимо знать не только средние значения характеристик теплоносителя, но и их распределение по сечению, а также учитывать возможные отклонения действительных значений характеристик от расчетных. Для этого нужны экспериментальные исследования с использованием новейшей измерительной техники.

При расчетах теплогидравлических характеристик тепловыделяющих сборок требуется учитывать массообмен между ячейками, прогибы и смещения тепловыделяющих элементов, влияние дистанционирующих решеток, неравномерность распределения теплоносителя по ячейкам. В Институте технической теплофизики существует действующий теплогидравлический стенд высоких параметров для исследования теплофизических процессов в элементах активных зон водоохлаждаемых ядерных реакторов (трубах, кольцевых каналах, пучках стержней). Стенд дает возможность проводить экспериментальные исследования кризиса теплообмена в каналах сложной геометрии в стационарных и не-

стационарных режимах в диапазоне изменения массовой скорости от 120 до 3500 кг/м²с, давления до 18 МПа, плотности теплового потока до 2,6 МВт/м². На основании экспериментальных данных, полученных в разное время, создана База данных по кризису теплообмена в трубах, кольцевых каналах, пучках стержней. В настоящее время проводятся фундаментальные исследования границ области режимов кипения в парогенерирующих каналах в широком диапазоне изменения давления [37,38], влияния смены режимов течения теплоносителя на энталпию поперечных потоков между ячейками пучка стержней [39]. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют верифицировать математические модели и компьютерные программы, используемые для обоснования безопасности АЭС. Так экспериментальные данные по перемешиванию теплоносителя в ячейках тепловыделяющих сборок позволяют получить замыкающие уравнения для коэффициентов межканального тепло- и массопереноса, которые используются в поканальных (ячейковых) теплогидравлических кодах, а также при трехмерном моделировании активной зоны реакторов. Наличие базы данных по кризису теплообмена позволило верифицировать математические модели для исследования нестационарных и аварийных режимов в теплообменном оборудовании АЭС [40–42].

На основе разработанной трехмерной математической модели двухфазного потока и нестационарной RNG k-ε модели турбулентности проведено численное исследование нестационарных теплофизических процессов в обогреваемых каналах при равномерной и неравномерной тепловой нагрузке [15,43,44].

Теплоперенос в наножидкостях при кипении

Особый интерес в теплофизике вызывают наножидкости – суспензии (коллоиды) наночастиц в базовой жидкости. Благодаря высокой эффективности отвода теплоты пузырьковое кипение наножидкости является предпочтительным во многих промышленных процессах. Однако отсутствие понимания механизмов, ответственных за кардинальные изменения теплопередачи в жидкостях с добавлением наночастиц, и отсутствие моделей прогнозирования этих изменений

препятствуют их широкому использованию.

По некоторым экспериментальным данным теплоперенос в наножидкостях увеличивается на 100...120 % по сравнению с исходной жидкостью [45]. Подобное явление нельзя описать моделями эффективной среды. Для объяснения основных эффектов аномального теплопереноса в наножидкостях использовались модели, учитывающие микроконвекцию, броуновское движение, наличие твердой пленки между жидкостью и наночастицами, различные модели кластеризации, модели внутренней радиационной передачи теплоты и т.п. Считается установленным, что при объемной доле наночастиц 0,1...3,0 % эффективное увеличение теплопереноса составляет 3...10 % [45]. При кипении наножидкости на обогреваемой поверхности наблюдается как увеличение, так и уменьшение коэффициента теплоотдачи, при этом критический тепловой поток в наножидкости может быть больше, чем в чистой жидкости [46–49]. В работе [47] были исследованы особенности теплоотдачи при кипении наножидкости Al_2O_3 – вода на вертикальной и горизонтальной обогреваемой поверхности. Коэффициент теплоотдачи при кипении наножидкости был меньше, чем в чистой жидкости и уменьшался с увеличением концентрации наночастиц. В результате осаждения наночастиц на обогреваемой поверхности наблюдалось менее активное зарождение пузырьков. С другой стороны критический тепловой поток в наножидкости увеличился на 32 % для горизонтальной и на 13 % для вертикальной обогреваемой поверхности.

В Массачусетском технологическом институте проводятся исследования по использованию наножидкостей для систем безопасности легководных ядерных реакторов, в частности для залива активной зоны при тяжелой аварии с потерей теплоносителя. Использование наножидкости для охлаждения горячей активной зоны может существенно увеличить скорость ее охлаждения. Были проведены экспериментальные исследования с целью изучения механизмов влияния наночастиц на процессы закалки металлических сфер в наножидкостях [50]. Авторы приходят к выводу, что увеличение шероховатости поверхности и смачиваемости вследствие осаждения нано-

частиц может быть ответственно за ускорение смены режима кипения от пленочного к пузырьковому и перехода к конвективному теплообмену.

Вопросы использования наножидкостей в качестве теплоносителя первого контура водоохлаждаемых реакторов исследуются как с точки зрения теплофизики, так и нейтронной физики [51]. Так, при очень низкой концентрации наночастиц их влияние на свойства теплоносителя минимально. Однако с повышением концентрации наночастиц происходит уменьшение эффективного коэффициента размножения K_{eff} и повышение отложений на стенках тепловыделяющих элементов. В диапазоне объемной доли наночастиц от 0,0001 до 0,1 наблюдается увеличение критического теплового потока и минимальное изменение коэффициента теплоотдачи пузырькового кипения. Результаты исследования изменения K_{eff} показали его уменьшение с увеличением объемной доли наночастиц, причем этот эффект для различных типов наночастиц различен. Для нормальной работы реактора с небольшим изменением K_{eff} наилучшей будет наножидкость Al_2O_3 – вода с объемной долей наночастиц 0,001. Наножидкости CuO – вода в наибольшем степени способствуют снижению K_{eff} . Отложения наночастиц на поверхности элементов активной зоны могут повысить безопасность ядерного реактора, но ценой снижения мощности.

Для выбора наиболее подходящих наножидкостей в качестве теплоносителя необходимы систематические исследования процессов тепломассопереноса в двухфазных потоках. В работах [52–54] представлены результаты теоретических исследований влияния наночастиц на процессы тепломассопереноса в наножидкостях при кипении и конденсации.

Заключение

Целью разработки новых ядерных технологий является решение проблем воспроизводства топлива, безопасности АЭС и обращения с радиоактивными отходами.

Внутренне присущая (естественная) безопасность открывает путь новой ядерной технологии, гармонически сочетающей качества безопасности, бридинга и экономичности.

Внедрение многокомпонентной структуры

ядерной энергетики в будущем позволит разным типам реакторов наилучшим образом удовлетворять требования по сферам их применения (электричество, теплота, производство водорода, транспорт, наработка изотопов), уровню мощности (большие, средние и малые энергоисточники), спектру нейтронов (быстрые, тепловые, специальные реакторы-дожигатели долгоживущих радиоактивных отходов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Осима К, Окубо О. Состояние и перспективы развития АЭС// Атомная техника за рубежом. – 2010. – №12. – С.20 – 24.
2. Pioro I., Kirillov P. Current status of electricity generation at nuclear power plants/ <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. – 2013. – Р.806 – 817.
3. Тюнин И.Б. Эволюционные и инновационные ядерные реакторы для ближайшей и отдаленной перспективы. Часть 1// Атомная техника за рубежом. – 2005. – №1. – С.3 – 10.
4. Ковецкий В.М., Ковецкая М.М. Направления развития технологий ядерных энергетических установок. Легководные реакторы// Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №13. – С.29 – 37.
5. Ковецкий В.М., Ковецкая М.М. Направления развития технологий ядерных энергетических установок. Часть 2. Тяжеловодные, жидкокометаллические и газовые реакторы// Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №14. – С.14 – 19.
6. Белозоров Д.П., Давыдов Л.Н. Современные проблемы ядерной энергетики: усовершенствованные реакторы Ш и Ш+ поколений// Вісник Харківського університету. – 2007. – №777. – С. 3 – 32.
7. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Пономарев-Степной Н.Н., Сидоренко В.А. Требования к атомным станциям XXI в.// Атомная энергия. – 2000. – т.88, №1. – С.3 – 14.
8. Патон Б.Е., Неклюдов И.М., Красноруцкий В.С. Будущее атомной энергетики определяет задачи ядерного топливного цикла Украины/ ISSN 1562-6016 ВАНТ. – 2013. – №5(87).
9. Pioro I., Kirillov P. Generation IY Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. – 2013. – p.818 – 830.
10. Тюнин И.Б. Эволюционные и инновационные ядерные реакторы для ближайшей и отдаленной перспективы. Часть 2// Атомная техника за рубежом. – 2005. – №2. – С.3 – 11.
11. Мацуи К. Тенденции разработок реакторов следующего поколения и реакторов нового типа в Японии// Атомная техника за рубежом . – 2004. – №4. – С.24 – 37.
12. Печера Ю. Международные инициативы в области разработок ЯЭУ и топливных циклов новых поколений // Атомная техника за рубежом. – 2005. – №7. – с.21 – 26.
13. Колочко В., Авраменко А., Ковецкий В., Ковецкая М. Перспективы использования высокотемпературных газовых реакторов // Энергоатом Украины. – 2009. – №2. – С.16 – 19.
14. Бронников В.А. ЯЭУ на основе модуля газовая турбина-реактор с гелиевым (GT-MHR) теплоносителем // Атомная техника за рубежом. – 2003. – №6. – С.20 – 22.
15. Авраменко А.А., Басок Б.И., Дмитренко Н.П., Ковецкая М.М., Тыринов А.И., Давыденко Б.В. Ренормализационно групповой анализ турбулентности. Киев. ТОВ «Видавничо- поліграфічний центр «ЕКСПРЕС» . – 2013. – 300с.
16. Дмитренко Н.П. Численное исследование теплообмена и гидродинамики в модельной активной зоне насыпного типа высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в условиях нестационарности // Промышленная теплотехника. – 2012. – т.34, №1. – С.48 – 52.
17. Дмитренко Н.П. Исследование гидродинамических и теплофизических характеристик в тепловыделяющей сборке высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов// Промышленная теплотехника. – 2009. – т.31, №4. – С.56 – 61.
18. Ковецкая М.М., Дмитренко Н.П., Скицко А.И., Кондратьева Е.А. Процессы теплообмена при течении гелия и воды сверхкритического давления в тепловыделяющей сборке// Промышленная теплотехника. – 2014. – т.36, №2. – С.46 – 53.
19. Кириллов П.Л. Водоохлаждаемые реакторы на воде сверхкритических параметров// Теплоэнергетика. – 2008. – №5. – С. 2–5.
20. Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z. Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor// Journal of Nuclear Science and Technology.

- 2008. – v.45, № 2. – P.138–148.
21. Семечков Ю.М., Духовенский А.С., Алексеев П.Н. и др. Проблемы и перспективы реакторов нового поколения со сверхкритическим давлением// Теплоэнергетика.– 2008. – №5. – С.6–11.
22. Глебов А.П., Клушин А.В. Реактор с быстрорезонансным спектром нейтронов, охлаждаемый водой сверхкритического давления при двухходовой схеме движения теплоносителя// Атомная энергия. – 2006. – т.100, №5. – С. 349–355.
23. Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Никитенко М.П. и др. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР-СКД) – перспективные реакторы 4-го поколения/ Труды конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» Россия, Подольск. – 2007.
24. Смирнов В.П., Папандин М.В., Лонинов А.Я., Ванюкова Г.В., Афонин С.Ю. Применение CFD – кода к расчету теплообмена в реакторе со сверхкритическими параметрами// Атомная энергия. – 2011. – т.111, № 4. – С.196–201.
25. Блинков В.Н., Габараев Б.А., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Нерешенные проблемы тепло- и массообмена водоохлаждаемых реакторных установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя. – М: ФГУП НИКИЭТ. – 2008. – 85 с.
26. Авраменко А.А., Кондратьева Е.А., Ковецкая М.М., Тыринов А.И. Гидродинамика и теплообмен потока воды с сверхкритическими параметрами в вертикальной сборке тепловыделяющих элементов// Инженерно-физический журнал. – 2013. – т.86, №4. – С. 760–767.
27. Петрушин В.В., Гуреева Л.В., Фадеев Ю.П., Шмелев И.В., Лепехин А.Н., Удалищев С.В. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности/ Сб. Атомные станции малой мощности т.2/ под ред. А.А. Саркисова/. – 2012. – С.36–49.
28. Чон-Кюн Парк. Атомные станции с передовыми реакторами малой и средней мощности – потенциальный вариант энергоснабжения для выполнения конкретных функций: Вступительное слово от МАГАТЭ/ Сб. Атомные станции малой мощности т.2/ под ред. А.А. Саркисова/. – 2012. – С.10–13.
29. Kidd S. SMRs – what are their prospects? // Nuclear Engineering International. – 2010. – v.66, № 677. –P.12–13.
30. Исаев А. Перспективы применения реакторов малой мощности с большой длительностью кампаний// Атомная техника за рубежом. –2007. – №6. – С.11–18.
31. Ковецкая М.М., Лаврик В.М., Ковецкий В.М. Проблемы и перспективы использования малых и средних ядерных реакторов// Проблеми загальноЯ енергетики. – 2003. – №9. – С.32–36.
32. Fetterman R., Smith M., Harkness A., Taylor C. Westinghouse SMR// Nuclear Engineering International. – 2012. – № 692. – P.16–19.
33. Ефанов А.Д., Калякин С.Г., Сорокин А.П. Теплофизические исследования в обоснование проектов ядерных реакторов нового поколения// Атомная энергия. – 2012. – т.112, №1. – С.12–18.
34. Кириллов П.Л. Основные направления научных исследований в области теплогидравлики атомных энергетических установок (Часть1)// Теплоэнергетика. – 2005. – №3. – С.15–19.
35. Кириллов П.Л. Основные направления научных исследований в области теплогидравлики атомных энергетических установок (Часть2)// Теплоэнергетика. – 2005. – №5. – С.47–52.
36. Гулевич А.В., Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Козлов Ф.А. Основные вопросы теплофизики ЯЭУ// Атомная энергия. – 2004. – т.96, №5. – С.380–387.
37. Антипов В.Г. Экспериментальное определение границ области неравновесного кипения в парогенерирующем канале// Промышленная теплотехника. – 2011. – т.33, №6 . – С.25–31.
38. Антипов В.Г. Теплообмен в области неравновесного кипения воды в вертикальной трубе// Промышленная теплотехника. –2015.–т.39, №3.– С.16–2.3
39. Авраменко А.А., Кондратьева Е.А., Ковецкая М.М., Тыринов А.И. Влияние режимных параметров на энтальпию поперечных потоков между ячейками пучка стержней// Промышленная теплотехника. – 2015. – т.37, №3. – С.16–23.
40. Ковецкая М.М., Колесниченко Ю.М., Богофори А.Т. Особенности нестационарного кризиса теплообмена в вертикальных парогенерирующих каналах// Промышленная теплотехника. – 2007. – т.29, №1. – С.43–48.
41. Ковецкая М.М., Домашев В.Е., Ковецкая Ю.Ю. Исследование кризиса теплообмена в парогене-

- рирующем канале при набросе мощности// Промышленная теплотехника. – 2012. – т.34, №6. – С.53–57.
42. Dolinsky A.A., Kovetskaya M.M., Skitsko A.I., Avramenko A.A., Basok B.I. Nonstationary Heat Transfer Crisis in Annular Dispersed Flows// Journal of Engineering Thermo physics. – 2008. – v.17, №2. – P.126–129.
43. Скицко А.И., Ковецкая М.М., Тыринов А.И. Численное исследование тепломассопереноса в вертикальном парогенерирующем канале под влиянием возмущающих факторов// Промышленная теплотехника. – 2013. – т.35, №6. – С.9–15.
44. Ковецкая М.М., Кондратьева Е.А., Скицко А.И. Влияние неравномерности тепловой нагрузки на локальные характеристики потока при течении воды в парогенерирующих каналах и тепловыделяющих сборках// Промышленная теплотехника. – 2014. – т.36, №3. – С.38–44.
45. Дмитриев А.С. Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 2// Теплоэнергетика. – 2011. – №4. – С.29–36.
46. Ramesh G., Prabhu N.K. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment//Nanoscale Research Letters. – 2011. – 6:334. – P.1–15.
47. Bang I.C., Chang S.H. Boiling Heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3 – water nanofluids from a plain surface in a pool// International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – 48. – P.2407–2419.
48. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review// International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – 46. – P.1–19.
49. Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E. Heat Transfer in Nanofluids – A Review//Heat Transfer Engineering. – 2006. – 27(10). – P.3–19.
50. Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.W. On the quenching of steel and zircaloy spheres in water– based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles// International Journal of Multiphase Flow. – 2009. – 35. – P.427–438.
51. Hadad K., Hajizadeh A., Jafarpour K., Hanapol B.D. Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000// Annals of Nuclear Energy. – 2010. – v.37, №11. – P.1447–1455.
52. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Heat transfer at film condensation of moving vapor with nanoparticles over a flat surface// International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – 82. – P.316–324. – Impact Factor:2.809.
53. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface// International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – 92. – P.106–118. – Impact Factor: 3.156.
54. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film// International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – 91. – P.77–88. – Impact Factor:2.809.

PERSPECTIVE RESEARCHES OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF NUCLEAR POWER PLANTS

A.A. Avramenko, M.M. Kovetskaya,
A.V. Kravchuk, Yu.Yu. Kovetskaya

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 03057, Kiev, vul. Zhelyabova 2a, Ukraine.

A review of perspective nuclear power technologies is presented for solving the problems of improving the safety and economic efficiency. The development of new nuclear technologies aimed at solving problems of reproduction of fuel, nuclear safety atomic electrical station and radioactive waste management. In future introduction of a multi-component structure of nuclear power will allow creating different types of reactors with best properties. A role of thermal physical investigation for improving light-water reactors is shown.

Key words: new generation of nuclear reactors, helium coolant, water supercritical pressure, thermophysical studies.

References 54, tabl. 5.

1. *Oshima K., Okubo O.* The condition and prospects of development of nuclear power plants // Atomic energy technology overseas. – 2010. – №12. – P.20 – 24. (Rus.)

2. *Pioro I., Kirillov P.* Current status of electricity generation at nuclear power plants/ <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. – 2013. – P.806 – 817.

3. *Tyunin I.B.* The evolutionary and innovative nuclear reactors for the near and distant future. Part 1 // Atomic energy technology overseas. – 2005. – №1. – C.3 – 10. (Rus.)

4. *Kovetskiy V.M., Kovetskaya M.M.* Directions of development of nuclear power plant technology. Light water reactors // Problems of general power industry. – 2006. – №13. – C.29 – 37. (Rus.)

5. *Kovetskiy V.M., Kovetskaya M.M.* Directions of development of nuclear power plant technology. Part 11. Heavy water, liquid metal reactors and gas // Problems of general power industry. – 2006. – №14.

– P.14–19 (Rus.)

6. *Belozorov D.P., Davydov L.N.* Current problems of nuclear power: III and III+ generations advanced reactors // Kharkiv University Herald. – 2007. – №777. – P. 3 – 32. (Rus.)

7. *Alekseev P.N., Haharynskyy A.Yu., Ponomarev-Stepnoy N.N., Sidorenko V.A.* Demands for nuclear power plants in XXI c. // Nuclear energy . – 2000. – V.88, №1 – P. 3 – 14. (Rus.)

8. *Paton B.Ye., Neklyudov I.M., Krasnorutskyy V.S.* The future of nuclear power determines tasks of Ukraine's nuclear fuel cycle // ISSN 1562-6016 VANT. – 2013. – №5(87). – P. 3 – 10. (Rus.)

9. *Pioro I., Kirillov P.* Generation IY Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/> – 2013 – P. 818 – 830.

10. *Tyunin I.B.* The evolutionary and innovative nuclear reactors for the near and distant future. Part 2 // Atomic energy technology overseas. – 2005. – №2. – C.3 – 11. (Rus.)

11. *Matsui K.* Trends in development of the next generation of reactors and new reactors in Japan // Atomic energy technology overseas. – 2004. – №4. – P. 24 – 37. (Rus.)

12. *Pechera Yu.* International initiatives in the development of nuclear power and fuel cycle of new generations // Atomic energy technology overseas. – 2005. – №7. – P. 21 – 26. (Rus.)

13. *Kolochko V., Avramenko A., Kovetskiy V., Kovetskaya M.* Prospects for the use of high-temperature gas reactors // Energoatom Ukraine. – 2009. – №2. – P. 16 – 19. (Rus.)

14. *Bronnikov V.A.* NPP on the basis of the gas turbine unit with helium reactor (GT-MHR) coolant // Atomic energy technology overseas. – 2003. – №6. – P.20 – 22. (Rus.)

15. *Avramenko A.A., Basok B.I., Dmitrenko N.P., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I., Davydenko B.V.* Renormalization group analysis of turbulence. – K.: Express. – 2013. – 299p. (Rus.)

16. *Dmitrenko N.P.* Numerical investigation of heat transfer and hydrodynamics in the model core bulk-type high-temperature gas-cooled reactors under unsteadiness // Industrial heat engineering. – 2012. – V.34, №1. – P.48 – 52. (Rus.)

17. *Dmitrenko N.P.* The study of hydrodynamic and thermal characteristics in the fuel assembly of high-

- temperature gas-cooled reactors // Industrial heat engineering. – 2009. – V.31, №4. – P.56 – 61. (Rus.)
18. Kovetskaya M.M., Dmitrenko N.P., Skitsko A.I., Kondratieva E.A. Heat transfer processes in the flow of helium and the supercritical water in the fuel assembly // Industrial heat engineering. – 2014. – V.36, №2. – P.46 – 53. (Rus.)
19. Kirillov P.L. Water-cooled reactors, supercritical water // Teploenergetika. – 2008. – №5. – P.2 – 5. (Rus.)
20. Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z. Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor//JournalofNuclearScienceandTechnology. – 2008. – V.45, № 2. – P.138–148.
21. Semechkov Yu.M., Duhovensky A.S., Alekseev P.N. Problems and prospects of the new generation of reactors with supercritical pressure // Teploenergetika. – 2008. – №5. – P.6 – 11. (Rus.)
22. Glebov A.P., Klushin A.V. The reactor with the fast-neutron resonance spectrum cooled supercritical water at a two-way movement of the coolant circuit // Nuclear energy. – 2006. – V.100, №5. – C.349 – 355. (Rus.)
23. Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B., Nikitenko M.P. Water-cooled reactors with supercritical parameters (WVER-SKD) – prospective reactors of the 4th generation / Conference proceedings "Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER" Russian, Podolsk. – 2007. (Rus.)
24. Smirnov V.P., Papandin M.V., Loninov A.Y., Vanyukova G.V., Afonin S.Yu. Application of CFD - code to the calculation of heat transfer in the reactor with supercritical parameters / Nuclear energy. – 2011. – V.111, № 4.– C.196 – 201. (Rus.)
25. Blinkov V.N., Gabaraev B.A., Melikhov O.I., Soloviev S.L. Unsolved problems of heat and mass transfer of water-cooled reactor plants with supercritical coolant parameters. – M: FGUP NIKIET. – 2008. – 85p. (Rus.)
26. Avramenko A.A., Kondratieva E.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I. Hydrodynamics and heat flow with supercritical parameters in the vertical assembly of fuel elements // Journal of Engineering Physics. – 2013. – V.86, №4. – C.760 – 767. (Rus.)
27. Petrushin V.V., Gureeva L.V., Fadeev Yu.P., Shmelev I.V., Lepekhin A.N., Udalischev S.V. Prospects for the development of nuclear power plants with reactors of low and medium power / Nuclear power station small / Ed. Sarkisov /. – 2012. – V.2 – P.36 – 49. (Rus.)
28. Jong-Kyun Park. Nuclear power plants with advanced reactors of low and medium power - energy potential option for a specific function: Opening remarks by MAGATE / Nuclear power station small / Ed. Sarkisov /. – 2012. – V.2 – P.10 – 13. (Rus.)
29. Kidd S. SMRs – what are their prospects? // Nuclear Engineering International. – 2010. –V.66, № 677. – P.12 – 13.
30. Isayev A. Prospects for the use of low-power reactors with a long duration of the campaign // Atomic energy technology overseas. – 2007. – №6. – C.11 – 18. (Rus.)
31. Kovetskaya M.M., Lavrik V.M., Kovetskiy V.M. Problems and prospects of small and medium-sized nuclear reactors // Total problems of zagalnoi power industry. – 2003. – №9. – C.32 – 36. (Rus.)
32. Fetterman R., Smith M., Harkness A., Taylor C. Westinghouse SMR// Nuclear Engineering International. – 2012. – № 692. –P.16 – 19.
33. Efanov A.D., Kalyakin S.G., Sorokin A.P. Thermal studies in support of projects of nuclear reactors of new generation//Nuclear energy. – 2012. – V.112, №1. – P.12 – 18. (Rus.)
34. Kirillov P.L. The main directions of research in the field of thermal hydraulics of nuclear power plants Research (Part 1) // Teploenergetika. – 2005. – №3. – C.15 – 19. (Rus.)
35. Kirillov P.L. The main directions of research in the field of thermal hydraulics of nuclear power plants Research (Part 2) // Teploenergetika. – 2005. – №5. – C.47 – 52. (Rus.)
36. Gulevich A.V., Efanov A.D., Kirillov P.L., Kozlov F.A. The main issues of Thermal Physics of nuclear power// Nuclear energy. – 2004. –V.96, №5. – C.380 – 387. (Rus.)
37. Antipov V.G. Experimental determination of the boundaries of the field of nonequilibrium boiling in the steam generating channel // Industrial heat engineering. – 2011. –V.33, №6 . – C. 25–31. (Rus.)
38. Antipov V.G. Heat transfer in a nonequilibrium boiling water in a vertical tube // Industrial heat engineering. – 2015. –V.39, №3. – C. 16 –23. (Rus.)
39. Avramenko A.A., Kondratieva E.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I. Influence of regime parameters on the enthalpy of the cross flows between cell bars beam // Industrial heat engi-

- neering. – 2015. – V.37, №3. – C. 16 – 23. (Rus.)
40. Kovetskaya M.M., Kolesnichenko Yu.M., Bogorosh A.T. Features of unsteady heat transfer crisis in the vertical steam-generating channels // Industrial heat engineering. – 2007. – V.29, №1. – C.43 – 48. (Rus.)
41. Kovetskaya M.M., Domashev V.E., Kovetskaya Yu., Yu. The study of heat transfer crisis in the steam generating channel at pounce power // Industrial heat engineering. – 2012. – V.34, №6. – C.53 – 57. (Rus.)
42. Dolinsky A.A., Kovetskaya M.M., Skitsko A.I., Avramenko A.A., Basok B.I. Nonstationary Heat Transfer Crisis in Annular Dispersed Flows // Journal of Engineering Thermo physics. –2008. –V.17, №2. – P.126 – 129.
43. Skitsko A.I., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I. Numerical study of heat and mass transfer in a vertical steam generating channel under the influence of disturbing factors // Industrial heat engineering. – 2013. –V.35, №6. – C.9 – 15. (Rus.)
44. Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A., Skitsko A.I. Effect of uneven heat load on the local characteristics of the flow during flow of water in the steam generating channel and the fuel assemblies // Industrial heat engineering. – 2014. –V.36, №3. – C.38 – 44. (Rus.)
45. Dmitriev A.S. The thermophysical problems nanoenergy. Part 2 // Teploenergetika. – 2011. – №4. – C.29 – 36. (Rus.)
46. Ramesh G., Prabhu N.K. Review of thermophysical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment // Nanoscale Research Letters. – 2011. – 6:334. – P.1–15.
47. Bang I.C., Chang S.H. Boiling Heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃ – water nanofluids from a plain surface in a pool // International Journal of Heat and Mass Transfer. –2005. – №48. – P. 2407 – 2419.
48. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review // International Journal of Thermal Sciences. –2007. – №46. – P.1–19.
49. Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E. Heat Transfer in Nanofluids – A Review // Heat Transfer Engineering. –2006. –V.27, №10. – P.3–19.
50. Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.W. On the quenching of steel and zircaloy spheres in water- based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles // International Journal of Multiphase Flow. – 2009. – №35. – P.427 – 438.
51. Hadad K., Hajizadeh A., Jafarpour K., Hanapol B.D. Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000 // Annals of Nuclear Energy. –2010. – V.37, №11. –P.1447–1455.
52. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Heat transfer at film condensation of moving vapor with nanoparticles over a flat surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – №.82. – P.316 – 324. – Impact Factor: 2.809.
53. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface // International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – №.92. – P.106 –118. – Impact Factor: 3.156.
54. Avramenko A.A., Tyrinov A.I. Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – №.91. –P.77–88. – Impact Factor: 2.809.

Получено 29.02.2016
Received 29.02.2016

УДК 620.92

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕКТОРУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ. ЧАСТИНА 1

Гелетуха Г.Г., канд. тех. наук, Железна Т.А., канд. тех. наук, Баштовий А.І., канд. тех. наук

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

Розглянуто поточний стан та перспективи розвитку сектору централізованого тепlopостачання в Європі, включаючи використання відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано основні моделі функціонування ринку теплової енергії. Показано, що ефективність роботи сектору залежить від ступеня розділення генерації та транспортування теплової енергії, можливості доступу незалежних виробників до тепломереж, існуючих форм власності.

Бібл. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: теплова енергія, централізоване тепlopостачання, ринок теплової енергії, відновлювані джерела енергії.

БМ – біомаса;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ТЕ – теплова енергія;

ТЕЦ – теплоелектроцентраль;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

ЦТ – централізоване тепlopостачання.

Загальна характеристика та перспективи розвитку сектору централізованого тепlopостачання в Європі

В Європейському Союзі найбільша частка кінцевого енергоспоживання (45 %) припадає на теплову енергію, що набагато більше, ніж у інших напрямках споживання: електроенергія – 20 %, транспортний сектор – 26 %, неенергетичне використання – 9 %. Житловий фонд використовує 40 % загального обсягу кінцевої енергії, з яких, в свою чергу, 68 % іде на опалення та 14 % – на гаряче водопостачання.

На сьогодні в Європі нараховується більше 6000 систем централізованого тепlopостачання, які забезпечують 12 % загальної потреби в теплової енергії. Послугами ЦТ користуються близько 60 млн. чоловік, і більше 140 млн. чоловік живуть в містах, де існує принаймні одна систе-

Рассмотрено современное состояние и перспективы развития сектора централизованного теплоснабжения в Европе, включая использование возобновляемых источников энергии. Проанализированы основные модели работы рынка тепловой энергии. Показано, что эффективность сектора зависит от степени разделения генерации и транспортировки тепловой энергии, возможности доступа независимых производителей к теплосетям, существующих форм собственности.

The paper covers state of the art and prospects for the development of district heating in Europe, including the use of renewable energy sources. Basic models of district heating system designs are analyzed. It is shown that efficiency of district heating operation depends on the extent of unbundling of heat generation and transmission, opportunities for third-party access to heat networks, existing types of ownership.

ма централізованого тепlopостачання. У 2013 році частка населення, що користується послугами ЦТ, перевищила 50 % у восьми європейських країнах: Ісландія – 92 %, Латвія – 65 %, Данія – 63 %, Литва – 57 %, Естонія – 62 %, Польща – 53 %, Швеція – 52 %, Фінляндія – 50 %.

Левова частина теплової енергії в системах ЦТ Європи (73 %) генерується ТЕЦ та когенераційними установками з використанням всіх видів палива, а також за рахунок скидної ТЕ промисловості. Близько 19 % виробляється котельними з викопних палив, а решта (8 %) – котельними на біомасі та іншими установками на ВДЕ (рис. 1). Цікаво, що в режимі ТЕЦ виробляється і більша частина теплової енергії з ВДЕ (67 %). Таким чином, очевидно, що в секторі ЦТ ЄС сумісне виробництво теплової та електричної енергії превалює над окремим виробництвом ТЕ.

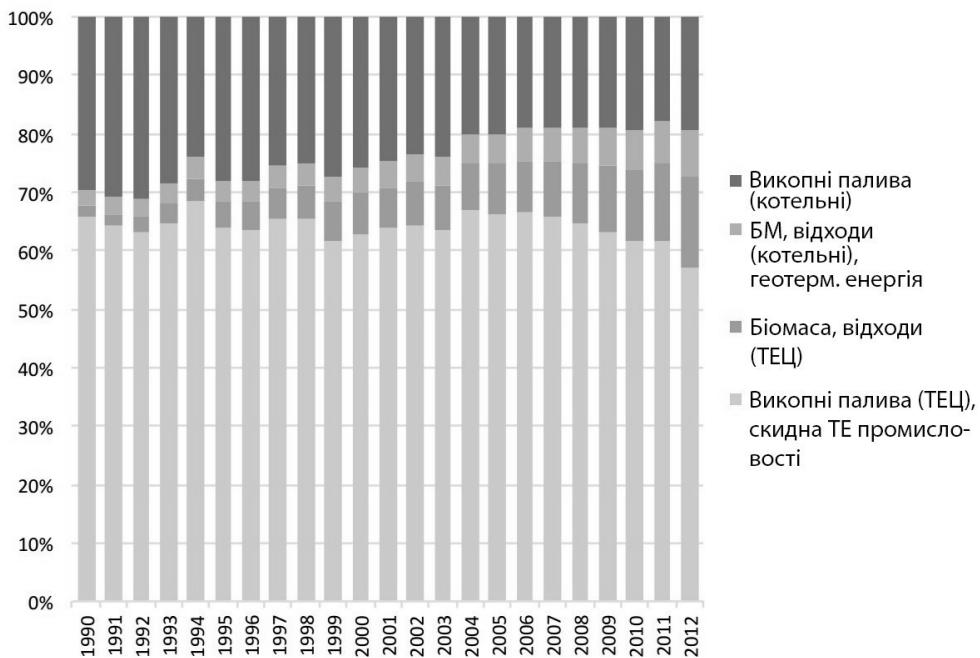


Рис. 1. Зміна структури генерації теплової енергії в секторі ЦТ Євросоюзу [1].

Протягом останніх 20 років має місце стійка тенденція збільшення загальної частки використання відновлюваних джерел в секторі ЦТ, і наразі в середньому по ЄС-28 вона складає більше 23 %. Для окремих країн Європи цей по-

казник суттєво відрізняється (рис. 2). Лідерами в даному напрямку є Ісландія, Норвегія, Данія, Франція, Швейцарія. У Сербії більше 90 % теплої енергії у системі централізованого теплопостачання виробляється з викопних палив.

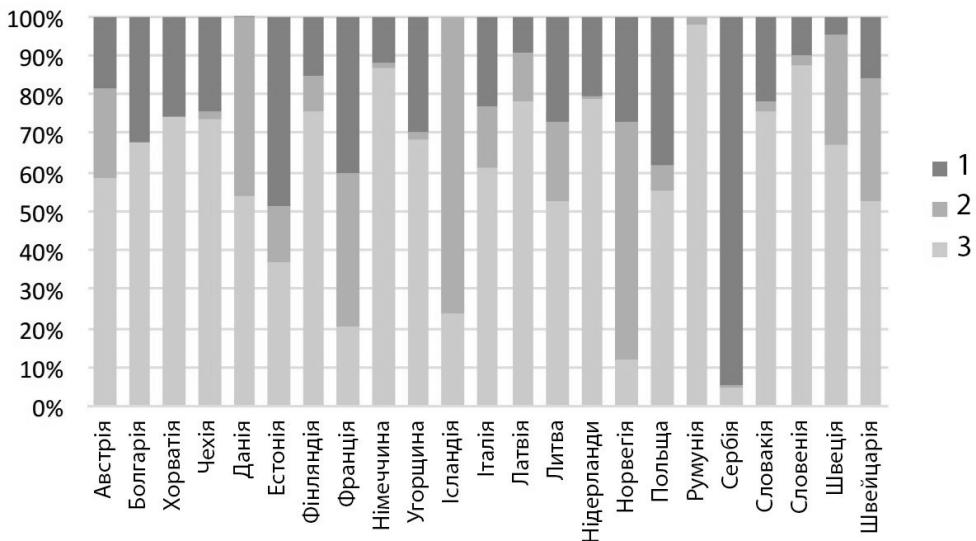


Рис. 2. Структура генерації теплової енергії у секторі ЦТ країн Європи (2012 р.) [1]:

- 1 – котельні на викопних паливах, електрокотли та 1/3 ТЕ з теплових насосів;
- 2 – котельні на біомасі та інші установки на ВДЕ (крім ТЕЦ); 3 – теплова енергія з ТЕЦ та когенераційних установок на всіх видах палива, а також скидна ТЕ промисловості та 2/3 ТЕ з теплових насосів.

Важливо зазначити, що згідно Директиви 2012/27/ЄС «Про енергоефективність» [2], ефективним централізованим теплопостачанням і охолодженням вважається система ЦТ або охолодження, що використовує мінімум 50 % відновлюваної енергії, 50 % скидної ТЕ технологічних процесів, 75 % ТЕ від когенерації або 50 % комбінації цих видів енергії. Також в Директиві 2012/27/ЄС дається визначення високоефективної когенерації: це когенераційне виробництво, що забезпечує економію первинної енергії на рівні мінімум 10 % порівняно з еталонними значеннями при окремому виробництві теплової та електричної енергії. Виробництво на дрібномасштабних і мікрокогенераційних установах, що забезпечує економію первинної енергії, також може класифікуватися як високоефективна когенерація.

До кінця 2015 р. країни-члени ЄС повинні були провести комплексну оцінку потенціалу застосування високоефективної когенерації та ефективного ЦТ і охолодження. Якщо ця оцінка виявила потенціал для впровадження відповідних технологій, вигода від яких перевищує витрати, то такі країни мають вжити належних заходів для розвитку інфраструктури ефективного ЦТ і охолодження, високоефективної когенерації та використання ТЕ і холоду, отриманих з ВДЕ та скидного енергопотенціалу технологічних процесів.

Тарифоутворення та існуючі форми власності у секторі централізованого теплопостачання

Надзвичайно важливими питаннями є регулювання ринку теплової енергії та встановлення тарифів. У країнах Європи наразі існують наступні підходи до встановлення тарифів [3]:

- Тарифи встановлюються теплопостачальними компаніями на конкурентному ринку теплової енергії. Спеціальний уповноважений орган наглядає за ринком теплової енергії на предмет виконання існуючих норм конкурентного права (Швеція, Фінляндія, Данія, Німеччина, Австрія, Бельгія, Франція, Великобританія). Згідно експертної думки, за умов даної моделі ринку ТЕ, ефективна конкуренція між ЦТ та іншими схемами теплопостачання не дає можливості домінуєчим постачальникам встановлювати

закищені (монопольні) ціни на ТЕ.

- Застосовується спеціальний підхід до встановлення тарифів з метою стимулювання ЦТ у порівнянні з іншими схемами теплопостачання, такими як електроопалення (Норвегія) та індивідуальне опалення на природному газі (Нідерланди).

- Максимальні тарифи визначаються згідно встановленої методології і дляожної компанії затверджуються незалежним національним регулятором. При цьому компанія може відступити від встановленого тарифу в сторону його зниження (Естонія, Латвія, Литва, Польща, Чехія, Словаччина, Угорщина, Болгарія, Македонія).

- Тарифи визначаються згідно встановленої методології та затверджуються національним регулятором. Теплопостачальна компанія не може відійти від встановленого її тарифу (Росія, Білорусь, Румунія, Україна).

Іншими, тісно пов'язаними між собою ключовими проблемами, є анбандлінг у секторі ЦТ та можливість доступу незалежних виробників до теплових мереж. Анбандлінг (від англ. unbundling – розділення) – юридичне розділення існуючих теплопостачальних компаній, принаймні, на дві незалежні компанії. Одна займається виробництвом теплової енергії, а друга – її транспортуванням та постачанням. Основною метою анбандлінгу є відокремлення виробництва від транспортування, оскільки, як очікується, це сприятиме полегшенню доступу незалежних виробників теплової енергії (в тому числі, з ВДЕ) до існуючих мереж.

Питання підключення незалежних виробників до теплових мереж згідно так званого принципу «доступу третьої сторони» і його вплив на розвиток конкурентного ринку ТЕ наразі активно досліджується та обговорюється в ЄС. Анбандлінг виробництва і транспортування, а також принцип «доступу третьої сторони» вже впроваджені в Євросоюзі на ринках електроенергії та природного газу. Оскільки сектор теплової енергії є набагато складнішим по своїй структурі, питанням власності та особливостям функціонування, проблема широкого застосування моделі «доступу третьої сторони» досліджується та аналізується експертами.

На сьогодні в Європі існують дві базові моделі ринку ЦТ [4]:

- Модель «єдиного покупця», згідно якої постачальник/оператор мережі купує ТЕ у всіх виробників і продає її споживачам одного типу на рівних умовах та по однаковій ціні. При цьому у різних ділянок теплової мережі можуть бути різні власники. Функціонування такої моделі можливе, якщо загальна відповідальність за продаж ТЕ кінцевому споживачу лежить на одній компанії, наприклад, операторі теплової мережі. За умов даної моделі вертикально інтегрований оператор тепломережі має надавати стороннім виробникам доступ до мережі на рівних умовах зі своєю власною генеруючою

потужністю (рис. 3, а). Модель «єдиного покупця» є найбільш розповсюженою у системах ЦТ країн Європи.

- Модель «відкритих теплових мереж», при якій виробник має гарантоване підключення до мережі за умови, що він напряму продає ТЕ своїм власним клієнтам в обсязі необхідного споживання (рис. 3, б). Наразі ця модель застосовується дуже обмежено через її складність. Прикладами практичної реалізації є кілька крупних міст Польщі. Експерти вважають, що модель «відкритих тепломереж» потребує більшого ступеню анбандлінгу системи ЦТ, ніж існує зараз в країнах ЄС.

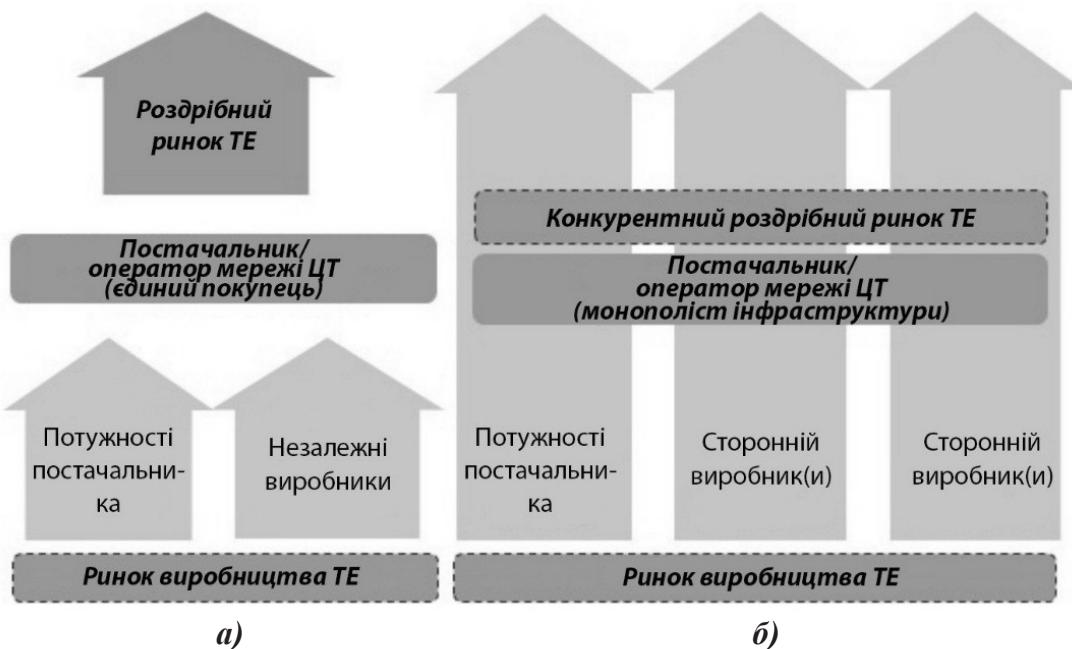


Рис. 3. Базові моделі ринку ЦТ [4]:
а) модель «єдиного покупця», б) модель «відкритих тепломереж».

Можливі наступні схеми реалізації принципу «доступу третьої сторони» до тепломереж при моделі «єдиного покупця» ринку ЦТ [4]:

1. Доступ на договірних умовах (нерегульований доступ).
2. Доступ на частково договірних умовах (частково регульований доступ).
3. Повністю регульований доступ.

При першому підході передбачається, що оператор мережі ЦТ та постачальник самі

визначають умови підключення незалежних виробників до теплової мережі. Вони також регулюють порядок та обсяги постачання теплової енергії до мережі від власних генеруючих потужностей та від незалежних виробників. Дано модель впроваджена, наприклад, у Німеччині, Швеції, Фінляндії. Вона спрацьовує, оскільки оператор мережі зацікавлений у підключенні джерела ТЕ з найменшою вартістю.

У другій схемі базові умови доступу до мережі визначені у національному законодавст-

ві, а деталі, що враховують місцеву ситуацію, можуть бути обговорені та узгоджені між власником тепломережі та незалежним виробником, який хоче підключитися. Можна навести наступні приклади застосування даної моделі:

- У Литві проводяться щомісячні аукціони між незалежними виробниками теплової енергії. При цьому мають виконуватися такі умови, що незалежний виробник не може постачати в мережу більше 1/3 загального теплового навантаження і його вплив на ціну ТЕ для кінцевого споживача не повинний бути дуже сильним.

- У Польщі тепlopостачальна компанія зобов'язана купувати теплову енергію з ВДЕ у під'єднаного до місцевої тепломережі виробника в обсягах, що не перевищують потреби споживачів, які обслуговуються даною мережею.

- В Естонії рішення про приєднання незалежних виробників до тепломережі приймається на основі обов'язкового тендера.

Третя модель передбачає, що умови доступу до теплової мережі повністю визначені у законодавстві або національним регулятором. Якщо незалежний виробник виконав ці вимоги, то власник тепломережі зобов'язаний його підключити. При даному підході важливо, щоб був реалізований анбандлінг, тобто виробництво теплової енергії, принаймні, було юридично відокремлене від транспортування. Практична реалізація моделі з повністю регульованим доступом до тепломережі пов'язана з рядом питань, що потребують ретельного аналізу, зокрема:

- Чи треба продовжувати приєднувати нових виробників до мережі, якщо не очікується ріст загального теплового навантаження системи ЦТ?

- Чи є оптимальним рішенням постачання ТЕ від багатьох малих виробників, якщо одна потужна установка (наприклад, ТЕЦ) може виробити потрібний обсяг і забезпечити при цьому кращі економічні показники?

Згідно доступних даних, модель з повністю регульованим доступом до тепломережі майже ніде не реалізована на практиці (за винятком кількох систем ЦТ у великих містах Польщі згідно схеми «відкритих тепломереж», які умовно можна віднести до даної моделі).

Існує стійка експертна думка, що витрати

на запровадження повністю або частково регульованого доступу до теплових мереж загалом менші, ніж очікувані економічні та інші вигоди від цього. Механізм приєднання незалежних виробників до тепломереж має бути прозорим, а правила – не дискримінаційними. Це особливо важливо у випадку, коли власник мережі має свої власні генеруючі потужності.

Можна зробити висновок, що ринок теплової енергії має суттєві відмінності у порівнянні з ринком електроенергії та природного газу. Питання перспективних напрямків розвитку сектору ЦТ, доцільних механізмів і моделей підвищення його конкурентності та ефективності потребують подальшого аналізу і дослідження.

Ефективність функціонування ринку теплової енергії також залежить від існуючих форм власності та управління. Наразі можна визначити чотири основні форми власності на об'єкти комунальної теплоенергетики [5]:

- повністю державна власність під контролем держави або муніципалітету (Гельсінкі, Мюнхен, Гетеборг, Віден, Будапешт);
- повністю приватна власність (Упсала, Мальме, Норчопінг, Берлін, Гамбург);
- змішана форма власності та управління – державно-приватна;
- неприбуткові кооперативи у комунальній власності (Данія, Австрія, Німеччина).

Перші дві форми – це 100 % власність держави або приватного капіталу при повній відсутності зобов'язань інших сторін. У категоріях змішаної та комунальної форми власності були розроблені різні моделі, такі як:

1. Договір на експлуатацію або управління (Бурос у Швеції).
2. Оренда (Таллінн, Вільнюс).
3. Концесія (Паріж).
4. Приватизація тільки генеруючих потужностей теплоенергетики (Копенгаген, Варшава, Брно, Рига, Бухарест).
5. Партнерство з міноритарною участю вибраних приватних компаній у статутному капіталі (Пльзень, Дюссельдорф).
6. Партнерство з міноритарною участю при-

ватного капіталу, залученого на фондовому ринку (Мангейм, Вроцлав).

7. Партнерство з мажоритарною участю

приватного капіталу (Прага, Братислава).

8. Повністю приватна власність з підтримкою з боку муніципалітету (Саутгемптон).

Табл. 1. Структура форми власності та ключові споживачі у системі ЦТ окремих країн ЄС [1, 5, 6]

| Країна | Виробництво ТЕ | | | Ключові споживачі | | |
|-----------|---|------------------------------------|----------------------------|-------------------|---------------|--------------------|
| | Форма власності | Кількість підприємств чи мереж (%) | Обсяг виробництва, ГВт·год | Житловий сектор | Промисловість | Сфера послуг, інше |
| Швеція | Муніципальна | 253 мережі (74 %) | 38616 (66 %) | 59 % | 12 % | 29 % |
| | Приватна | 66 мереж (19 %) | 15818 (27 %) | | | |
| | Державна | 25 мереж (7 %) | 4364 (7 %) | | | |
| Данія | Муніципальна | 55 | ~65 % | 64 % | 6 % | 30 % |
| | Кооперативи споживачів | ~350 | ~35 % | | | |
| Фінляндія | Муніципальна | 17 | 11750 (39 %) | 55 % | 10 % | 35 % |
| | Акціонерні компанії у муніципальній власності | 78 | 14067 (47 %) | | | |
| | Приватна | 4 | 4197 (14 %) | | | |
| Литва | Муніципальна | ~60 % | - | 72 % | 7 % | 21 % |
| | Орендовані | ~40 % | - | | | |
| Австрія | Державна (муніципальна) | 90 % | - | 37 % | 14 % | 49 % |
| | Приватна | 10 % | - | | | |
| Польща | Державна | 14 (3 %) | - | 70 % | 8 % | 22 % |
| | Житлово-будівельні кооперативи | 14 (3 %) | - | | | |
| | Муніципальна | 41 (9 %) | - | | | |
| | Акціонерні товариства | 118 (26 %) | - | | | |
| | ТОВ | 250 (55 %) | - | | | |
| | Інше | 18 (4 %) | - | | | |
| Латвія | Майже всі компанії – у муніципальній власності. Приватна власність – лише в окремих випадках. | 68 систем ЦТ | 8 % (приватні компанії) | 72 % | 2 % | 26 % |

Ці вісім варіантів містять приклади повної власності держави з участю приватного капіталу в управлінні, змішаної власності та повної приватної власності з певними зобов'язаннями з боку держави. Тому ця класифікація відображає не тільки форми власності, але й форми управління підприємствами централізованого тепло-

постачання. Створюють і інші форми державно-приватні партнерства в цілях фінансування, модернізації систем ЦТ та підтримки споживачів.

Аналіз наявних даних свідчить про те, що тенденція до приватизації систем централізованого теплопостачання посилюється як у західноєвропейських країнах, так і у країнах

Центральної та Східної Європи. Наразі у різних країнах ЄС частка приватних форм власності у секторі ЦТ складає до 40 % (табл. 1).

Висновки

Аналіз ситуації у секторі централізованого теплопостачання Європи показує, що розвинені країни вже створили конкурентний ринок теплової енергії, а решта країн рухаються в цьому напрямку. Практично у всіх країнах Євросоюзу в більшій чи меншій мірі проведено анбандлінг у секторі теплової енергії та забезпечені умови для доступу незалежних виробників до теплових мереж. Тенденція до приватизації систем централізованого теплопостачання посилюється як у західноєвропейських країнах, так і у країнах Центральної та Східної Європи. Наразі у різних країнах ЄС частка приватної форми власності у секторі ЦТ складає до 40 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. *District Heating and Cooling. Country by Country 2015 Survey.* Euroheat&Power.
[http://www.euroheat.org/DHC---Statistics-4.aspx?P
ID=417&M=NewsV2&Action=1&NewsId=557](http://www.euroheat.org/DHC---Statistics-4.aspx?P>ID=417&M=NewsV2&Action=1&NewsId=557)
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on

energy efficiency

[http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF
/?uri=OJ:L:2012:315:FULL&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2012:315:FULL&from=EN)

3. Harri-Pekka Korhonen. Overview of DH pricing and regulation in Europe. Fortum, 2012.

http://www.1sta.lt/files/events/121204_FORTUM/10_Overview%20of%20DH%20pricing%20and%20regulation%20in%20Europe_H-P%20Korhonen.pdf

4. Regulated third-party access in heat markets: how to organize access conditions. Oxera Agenda, June 2014.

<http://www.oxera.com/getmedia/195b43b0-6bd3-4fc4-8b13-df95f80acf2e/Regulated-third-party.pdf.aspx?ext=.pdf>

5. District Heating System Ownership Guide. DHCAN, 2004

<http://projects.bre.co.uk/DHCAN/pdf/OwnershipManagement.pdf>

6. Britt Aronson, Stefan Hellmer: An International Comparison of District Heating Markets, 2009.

<http://www.svenskfjarrvarme.se/Global/FJ%C3%84RRSYN/Rapporter%20och%20resultatblad/Rapport%20marknad/2009/An%20International%20Comparison%20of%20District%20Hetaing%20Markets.pdf>

ANALYSIS OF OPERATION MODELS IN THE DISTRICT HEATING SECTOR OF EU COUNTRIES. PART 1

Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovy A.I.

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

The paper covers state of the art and prospects for the development of district heating in Europe, including the use of renewable energy sources. Basic models of district heating system designs and existing ownership types are analyzed. It is shown that single buyer model where the heat supplier/network operator offers heat to similar end customers on equal terms and prices is the most common design of district heating systems across Europe. Efficiency of district heating operation depends on the extent of unbundling of heat generation and transmission, opportunities for third-party access to heat networks and existing types of ownership. It can be observed that many developed European countries have already created the competitive heat market, and the rest of EU countries are on the path to it. Almost all EU countries implemented unbundling in heat market to a greater or lesser extent, and provided network access for third-party heat producers.

References 7, tables 1, figures 3.

Key words: heat, district heating, heat market, renewable energy sources.

1. *District Heating and Cooling. Country by Country 2015 Survey.* Euroheat&Power.
<http://www.euroheat.org/DHC---Statistics-4.aspx?P-ID=417&M=NewsV2&Action=1&NewsId=557>
2. *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency*
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2012:315:FULL&from=EN>
3. *Harri-Pekka Korhonen. Overview of DH pricing and regulation in Europe.* Fortum, 2012.
http://www.1sta.lt/files/events/121204_FORTUM/10_Overview%20of%20DH%20pricing%20and%20regulation%20in%20Europe_H-P%20Korhonen.pdf
4. *Regulated third-party access in heat markets: how to organize access conditions.* Oxera Agenda, June 2014.
<http://www.oxera.com/getmedia/195b43b0-6bd3-4fc4-8b13-df95f80acf2e/Regulated-third-party.pdf.aspx?ext=.pdf>
5. *District Heating System Ownership Guide.* DHCAN, 2004
<http://projects.bre.co.uk/DHCAN/pdf/OwnershipManagement.pdf>
6. *Britt Aronson, Stefan Hellmer. An International Comparison of District Heating Markets,* 2009.
<http://www.svenskfjarrvarme.se/Global/FJ%C3%84RRSYN/Rapporter%20och%20resultatblad/Rapport%20marknad/2009/An%20International%20Comparison%20of%20District%20Hetaing%20Markets.pdf>

Получено 09.03.2016
Received 09.03.2016

УДК 620.92

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ДЕРЕВНОГО ПАЛИВА З ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ В УКРАЇНІ

Желєзна Т.А., канд. тех. наук, **Баштовий А.І.,** канд. тех. наук, **Гелетуха Г.Г.,** канд. тех. наук

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

Проаналізовано темпи розвитку біоенергетики в Україні. Розглянуто можливості отримання деревного біопалива з додаткових джерел, таких як полезахисні лісові смуги, лісові насадження вздовж автомобільних доріг та залізниць, а також сухостій. Показано, що за рахунок вказаних додаткових джерел можна збільшити енергетичний потенціал деревної біомаси в Україні у більше ніж 2 рази.

Проанализированы темпы развития биоэнергетики в Украине. Рассмотрены возможности получения древесного биотоплива из дополнительных источников, таких как полезащитные лесополосы, лесные насаждения вдоль автомобильных и железных дорог, а также сухостой. Показано, что за счет указанных дополнительных источников можно увеличить энергетический потенциал древесной биомассы в Украине в более чем 2 раза.

Rate of development of bioenergy in Ukraine is analyzed. The paper considers possibilities for obtaining wood fuel from such additional sources as shelterbelt forests, shelter forests along motor roads and railways and dead wood. It is shown that the use of these additional sources may increase the energy potential of wood biomass in Ukraine in more than two times.

Бібл. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, деревна біомаса, деревне паливо, полезахисні лісосмуги, сухостій, енергетичний потенціал.

ЛС – лісосмуга;

НПДВЕ – Національний план дій з відновлюваної енергетики;

ПГ – природний газ;

ПЗЛС – полезахисні лісові смуги;

ТЕ – теплова енергія;

ТЕЦ – теплоелектроцентраль;

у.п. – умовне паливо.

Тенденції розвитку біоенергетики в Україні

Аналіз даних Енергетичного балансу України за 2010...2014 рр. показує значне зростання обсягів виробництва та використання біопалив – у середньому на 42 % на рік [1]. При такому ж тренді розвитку біоенергетики, у 2020 р. біопаливами буде заміщатися 5,38 млрд. м³/рік природного газу (рис. 1). Цілі Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [2], перераховані у обсяги заміщення природного газу (сума об'ємів заміщення ПГ при виробництві теплової енергії у котельних та при сумісному виробництві ТЕ з електроенергією в режимі ТЕЦ), свідчать про те, що у 2020 році передбачено заміщення 7,2 млрд. м³/рік природного газу за рахунок біомаси.

Хоча біоенергетика в Україні розвивається досить динамічно, очевидно, що цих темпів все ж недостатньо для досягнення цілей НПДВЕ по

біомасі на 2020 р. Підвищення темпів розвитку біоенергетики означає збільшення обсягів використання біомаси для потреб енергетики. В першу чергу, це мають бути відходи сільського господарства та енергетичної культури. Але треба зазначити, що деревна біомаса також є має певні ресурси для збільшення свого енергетичного потенціалу.

Деревина традиційно широко застосовується в Україні для енергетичних потреб. Раніше це були, в основному, дрова, які населення використовувало в пічках, грубках та побутових котлах. Останнім часом у країні з'явилася велика кількість зарубіжного та вітчизняного сучасного обладнання для спалювання деревної тріски, гранул, брикетів. Попит на деревну біомасу як паливо збільшується, а її технічний потенціал є доволі обмеженим – близько 2 млн. т у.п./рік (відходи рубок та деревообробки, дрова для опалення) і вже майже повністю утилізується.

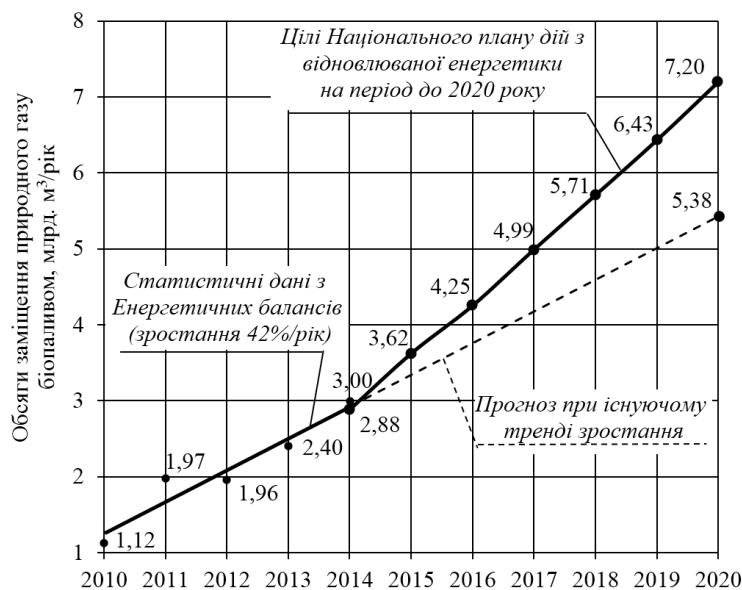


Рис. 1. Тенденції розвитку біоенергетики в Україні.

Обсяги заготівлі ліквідної деревини (а, відповідно, і обсяги відходів лісозаготівлі), у тому числі дров, можна назвати скоріше стабільними, ніж постійно зростаючими в Україні (рис. 2). Усі держлігоспи мають так звану «розрахункову лісосмугу», затверджену на роки вперед. Для її збільшення необхідно отримати дозвіл

у Державному агентстві лісових ресурсів та Міністерстві екології та природних ресурсів, що є практично нереальним. Тому актуальним є пошук і аналіз додаткових джерел деревного палива, серед яких можуть бути полезахисні лісосмуги, лісонасадження уздовж автомобільних доріг і залізниць, а також сухостій.

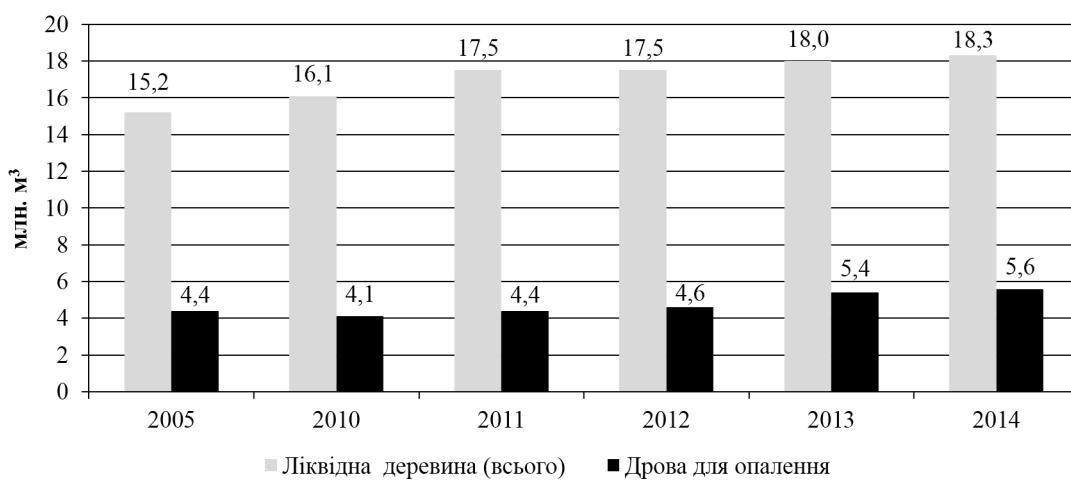


Рис. 2. Заготівля ліквідної деревини в Україні [3].

Полезахисні лісові смуги

Полезахисні лісові смуги – це штучні насадження, які розмежовують масиви ріллі, виконуючи кліматорегулювальні, ґрунтозахисні та водоохоронні функції. Внаслідок невизначеності правової ситуації з балансоутримувачами ПЗЛС, що склалася в Україні, ці насадження протягом

багатьох років не отримують належного догляду і поступово втрачають свої захисні властивості. Полезахисні лісові смуги нагально потребують реконструкції (санітарні рубки, рубки догляду) і відновлення (насадження нових плантацій). Завдяки виконанню таких робіт можна додатково отримувати до 1 млн. т у.п./рік деревного палива

ва. Ця оцінка ґрунтується на даних щодо площі ПЗЛС в Україні та можливого обсягу утворення деревних відходів при їх реконструкції.

За офіційними статистичними даними, на сьогодні в Україні налічується близько 446 тис. га полезахисних лісових смуг. Найбільші площини знаходяться у Запорізькій (51,9 тис. га), Одеській (50 тис. га) та Дніпропетровській (42,5 тис. га) областях, тоді як в Івано-Франківській, Рівненській та Чернівецькій областях ПЗЛС взагалі немає. Ряд спеціалістів вважають офіційні дані статистики неточними, посилаючись на те, що полезахисні лісові насадження зазнають незаконних рубок, а їх державний облік не здійснювався з 1976 р.

Деревина у ПЗЛС України є, переважно, низькосортною (до 90 % і більше), тому біомасу, отриману в ході санітарних рубок та рубок додгляду, можна майже повністю застосувати на потреби енергетики, не порушуючи критеріїв сталого розвитку. Згідно експертних оцінок, при виконанні робіт з реконструкції полезахисних лісосмуг можна отримувати 100...200 щільних м³ низькосортної деревини на гектар. В масштабах країни (446 тис. га ПЗЛС) це дає 30...60 млн. т, або 0,5...1,0 млн. т у.п./рік (у розрахунку на 20 років).

Нормативно-правовою базою, що регулює створення захисних лісових насаджень лінійного типу (до яких відносяться ПЗЛС) та проведення у них лісовпорядніх робіт, є Концепція розвитку агролісомеліорації в Україні (2013 р.) [4]. Реалізація Концепції передбачена протягом 2014...2025 рр. у відповідності до затвердженого Плану заходів [5]. Серед іншого, План заходів включає забезпечення лісовпорядкування захисних лісових насаджень, а також підготовку пропозицій щодо внесення відповідних змін і доповнень до законодавчих та інших нормативно-правових актів. Вважаємо за необхідне на основі Концепції розробити також Державну програму, яка б, з урахуванням науково-обґрунтованих підходів, містила детальні плани щодо реконструкції та відновлення ПЗЛС та терміни їх виконання.

Лісонасадження вздовж автомобільних доріг та залізниць

При експлуатації автомобільних доріг основ-

ним джерелом впливу на атмосферне повітря є транспортні засоби. Для зниження рівня забруднення повітря, серед інших природоохоронних заходів технологічного, санітарно-технічного та організаційного напрямів, застосовують лісонасадження вздовж доріг. Крім того, при експлуатації автомобільних доріг також мають місце фізичні фактори впливу на навколошнє середовище, до яких відносяться акустичний вплив та вібрація. Лісові насадження відіграють важливу роль у їх зменшенні до нормативних значень [6].

Треба зазначити, що, окрім позитивної ролі (зниження рівня забруднення повітря, зменшення рівня шуму), лісонасадження вздовж доріг у їх існуючому в Україні вигляді відіграють наразі і певну негативну роль. Якщо при виникненні аварійної ситуації автомобіль з'їжджає на узбіччя, то у разі його зіткнення зі стовбуrom дерева ймовірність летального кінця для водія набагато більша, ніж при зіткненні з чагарником. Тому у світовій практиці все частіше вважається за доцільне поступово замінити лісосмуги вздовж автомобільних доріг на чагарникові насадження. Деревна біомаса, отримана в процесі цієї діяльності, може бути використана на енергетичні потреби.

Статистичні дані щодо площини захисних лісосмуг вздовж доріг відсутні, оскільки їх збір не передбачений формами Державної служби статистики України. Тому можна виконати тільки експертну оцінку, виходячи із довжини автомобільних доріг загального користування державного значення (49117,4 км) та можливої ширини лісосмуг (10 м). Приймаючи, що реконструкція лісосмуг буде виконуватися на чверті довжини цих доріг протягом 10 років, обсяг отриманого деревного палива становитиме близько 1,5 млн. т або 51,4 тис. т у.п./рік.

Згідно Державних будівельних норм [7], захисні лісові насадження вздовж залізниць використовуються для їх захисту від снігових, піщаних та земляних заметів, шкідливого впливу інших несприятливих природних явищ, а також для захисту від шуму при проходженні потягів та від пилу при масових перевезеннях сипучих вантажів. Слід зазначити, що при виборі технічних заходів для такого захисту залізниці перевага

надається створенню захисних лісонасаджень.

Оскільки статистичні дані щодо площі захисних лісонасаджень вздовж залізниць та кож відсутні, виконаємо експертну оцінку, ґрунтуючись на довжині залізничних колій загального користування (20948,1 км), можливій ширині лісосмуг (15 м) та таких же припущеннях, що були прийняті відносно лісосмуг вздовж автомобільних доріг. Тоді обсяг деревного палива, отриманого від реконструкції захисних лісонасаджень вздовж залізниць України складатиме близько 0,96 млн. т або 32,7 тис. т у.п./рік.

Сухостій

Сухостій – це засохлі дерева і кущі, які стоять на корені. Причина утворення сухостою – різкі кліматичні коливання температури, вологи, «нижня пожежа» (вигорання сухої трави, при якому дерева ще не займаються, але суттєво пошкоджуються), термічне, хімічне, механічне чи інше суттєве пошкодження кореневищ, кори чи листяного покриву дерев, а також їх старіння, всихання. Фахівці лісового господарства не заперечують, що сухостій зі звичайних лісів майже повністю може бути утилізований для потреб енергетики. Але обов'язково треба залишати на місті кілька великих дерев на гектар для збереження біорозмаїття.

Сухостій існує практично у всіх лісах і разом з іншими видами деревного відпаду відіграє важливу роль у процесі кругообігу органічної речовини. За нормальних умов обсяг сухостою становить до 10...11 м³/га. Окремим небезпечним для екології випадком є масове висихання дерев,

коли запас сухостою на гектар збільшується на порядок. Таким прикладом є масштабне висихання смерек в Українських Карпатах на площі 30...35 тис. га (Івано-Франківська та Львівська області).

Спеціалісти лісового господарства вважають, що існуюча система обліку лісів не забезпечує достовірної інформації про запаси та динаміку кількості мертвої деревини (у т.ч. сухостою) у лісах України. Використовуючи певний методичний підхід, фахівці Національного університету біоресурсів і природокористування оцінили запас сухостою в Україні у 92,6 млн. м³ (зі середньоквадратичною похибкою 10...15 %) [8]. Якщо припустити, що лише половина загального потенціалу сухостою є технічно досяжною та економічно доцільною для утилізації протягом 10 років, то цей обсяг складатиме 32,4 млн. т або 1,44 млн. т у.п./рік.

Таким чином, підсумовуючи зазначене вище, загальний об'єм деревного палива з додаткових джерел в Україні можна оцінити у 2,5 млн. т у.п./рік (табл. 1). Цей обсяг є дуже вагомим, оскільки він збільшує існуючий енергетичний потенціал деревини (2 млн. т у.п./рік з традиційних джерел) у 2,3 рази до 4,5 млн. т у.п./рік (рис. 3). При цьому найбільші частки потенціалу припадають на сухостій (32 %), дрова (29 %) та деревину з ПЗЛС (21 %).

Для реалізації проектів з реконструкції та відновлення ПЗЛС, отримання деревного палива шляхом впорядкування інших захисних насаджень, а також заготівлі сухостою необхідна

Таблица. Енергетический баланс Земли (тепловые потоки, ТВт)

| Джерело деревного палива | Загальний ресурс, млн. т ¹ | Кількість років використання (орієнтовно) | Річний потенціал деревного палива (технічний, економічний) | |
|----------------------------|---------------------------------------|---|--|------------------|
| | | | тис. т/рік | тис. т у.п./рік |
| Полезахисні лісосмуги | 54,6 | 20 | 2730 | 932 ² |
| Лісосмуги вздовж автодоріг | 1,5 | 10 | 150 | 51,4 |
| Лісосмуги вздовж залізниць | 0,96 | 10 | 96 | 32,7 |
| Сухостій | 32,4 | 10 | 3240 | 1440 |
| Всього | 89,46 | | 6216 | 2456 |

¹ Для оцінки технічного/економічного потенціалу деревного палива.

² Виходячи з показника утворення деревних відходів 175 щільних м³/га.

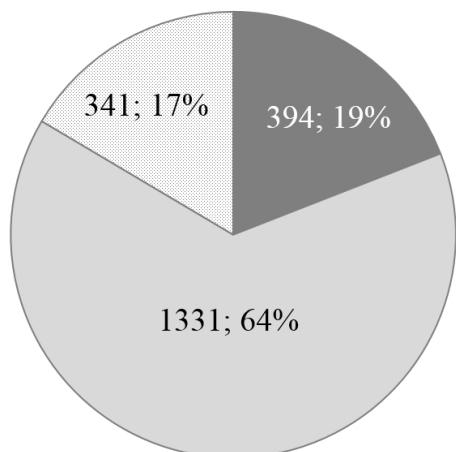
можливість участі приватних компаній, які будуть здатні залучити відповідні матеріальні та фінансові ресурси. Для цього потрібно зробити ряд змін та доповнень до чинного законодавства України. Ці зміни мають врегулювати ряд важливих питань, у тому числі:

- визначення власника і балансоутримувача полезахисних лісосмуг;
- надання права на проведення тендера по виконанню робіт з реконструкції та відновлення ПЗЛС місцевим органам влади на рівні не нижче обласних державних адміністрацій;

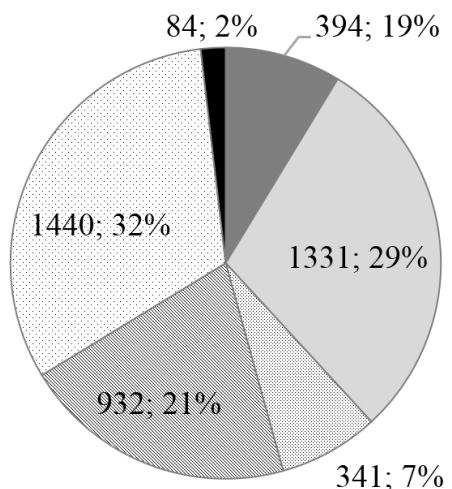
- забезпечення можливості довгострокової оренди ПЗЛС та інших захисних лісонасаджень приватними компаніями;

- забезпечення можливості доступу приватного бізнесу до сухостою та порубкових залишків.

Детальнішу інформацію по розглянутих вище питаннях, у тому числі пропозиції щодо реалізації пілотного проекту з реконструкції та відновлення полезахисних лісосмуг в одній з областей України, представлено у роботі [9].



- Відходи лізозаготівлі
- Дрова для опалення
- Деревні відходи
- ▨ Деревина з ПЗЛС
- ▨ Сухостій
- ЛС вздовж автодоріг та залізниць



Деревна біомаса з традиційних джерел: загалом 2067 тис. т у.н./рік[3].

Деревна біомаса з традиційних та додаткових джерел: загалом 4523 тис. т у.н./рік

Рис. 3. Енергетичний потенціал деревної біомаси в Україні (2014 р.).

Висновки

Останні кілька років темпи розвитку біоенергетики в Україні є доволі високими – ріст обсягів виробництва та використання біопалив становить, в середньому, близько 42 % на рік. Але цих темпів все ще недостатньо для досягнення цілей НПДВЕ по біомасі на 2020 рік – заміщення 7,2 млрд. м³/рік природного газу. Підвищенню темпів розвитку біоенергетики означає збільшення обсягів використання біомаси для потреб енергетики. У першу чергу, це мають бути відходи сільського господарства та енергетичної культури. Але деревна біомаса також є має певні ресурси для нарощування свого енергетичного потенціалу. Разом із

традиційними джерелами деревного палива (відходи лізозаготівлі та деревообробки, дрова) необхідно розглядати можливості використання додаткових джерел, таких як полезахисні лісосмуги, лісонасадження уздовж автомобільних доріг і залізниць, а також сухостій. За рахунок вказаних додаткових джерел можна збільшити енергетичний потенціал деревної біомаси в Україні у більше ніж 2 рази. Для можливості практичної реалізації проектів з реконструкції та відновлення ПЗЛС, отримання деревного палива шляхом впорядкування інших захисних насаджень, а також заготівлі сухостою необхідне внесення ряду змін та доповнень до чинного законодавства України.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Енергетичний баланс України за 2007-2014 pp.* Державна служба статистики України https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm
2. *Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року.* Затверджений Розпорядженням КМУ №902-р від 01.10.2014
3. *Статистичний щорічник України за 2014 рік.* Державна служба статистики України, 2015.
4. *Концепція розвитку агролісомеліорації в Україні.* Схвалено Розпорядженням КМУ № 725-р від 18.09.2013.
5. *План заходів щодо реалізації Концепції розвитку агролісомеліорації в Україні.* Затверджено Розпорядженням КМУ № 582-р від 18.06.2014.
6. *Екологічні вимоги до автомобільних доріг.* Проектування. ГБН В.2.3-218-007:2912. Укравтодор, 2012.
7. *Споруди транспорту. Залізниці колії 1520 мм.* Норми проектування. ДБН В.2.3-19-2008. Мінрегіонбуд України, 2008.
8. *Вуглець, клімат та землеуправління в Україні: лісовий сектор:* Монографія / [А. Швиденко, П. Лакида, Д. Щепащенко, Р. Василишин, Ю. Марчук]. – Корсунь-Шевченківський: ФОП Гаврищенко В.М., 2014. – 283 с.
9. *Железна Т.А., Баштовий А.І., Гелетуха Г.Г.* Аналіз додаткових джерел деревного палива в Україні. Аналітична записка № 15 Біоенергетичної асоціації України, 2016. <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-15-ua.pdf>

**ANALYSIS OF POSSIBILITY TO OBTAIN
WOOD FUEL FROM ADDITIONAL SOURCES
IN UKRAINE**

Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I., Geletukha G.G.

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

Rate of development of bioenergy in Ukraine is analyzed. It is shown that in order to meet the target for biomass of the National Renewable Energy Action Plan until 2020 it is necessary to speed up bioenergy development. That means increasing volumes of biomass for energy production. The increase of biomass volumes should be realized first at the expense of agricultural residues and energy crops as their potential is much bigger than that of wood. At that wood biomass also has some resources to increase its energy potential. In addition to conventional sources of wood fuel such as felling residues, wood processing waste and fuelwood, there may be other sources like shelterbelt forests, shelter forests along motor roads and railways and dead wood. The paper considers possibilities for obtaining wood fuel from these additional sources. It is shown that the use of these sources may increase the energy potential of wood biomass in Ukraine in more than two times. Realization of projects on reconstruction of shelterbelt forests and cutting of dead wood with the involvement of private companies requires some amendments to the existing legislation of Ukraine.

References 7, tables 1, figures 3.

Key words: biomass, biofuel, wood biomass,

wood fuel, shelterbelt forests, dead wood, energy potential.

1. *Energy Balance of Ukraine for 2007-2014.*
State Statistics Service of Ukraine
https://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm
2. *National Renewable Energy Action Plan until 2020.* Approved by CMU Resolution № 902-p of 01.10.2014. (Ukr)
3. *Statistical Yearbook of Ukraine for 2014.*
State Statistics Service of Ukraine, 2015.
4. *Conception for the development of agricultural afforestation in Ukraine.* Approved by CMU Resolution № 725-p of 18.09.2013. (Ukr)
5. *Action Plan for the implementation of Conception for the development of agricultural afforestation in Ukraine.* Approved by CMU Resolution № 582-p of 18.06.2014.
6. *Environmental requirements to motor roads. Designing.* ГБН В.2.3-218-007:2912. Ukravtodor, 2012.
7. *Transport constructions.* Railway tracks of 1520 mm. Designing norms. ДБН В.2.3-19-2008. Minregionbud of Ukraine, 2008.
8. *Carbon, climate and land management in Ukraine:* forest sector: Monograph / [A. Shvydenko, H. Lakyda, D. Schepaschenko, R. Vasylyshyn, Yu. Marchuck]. – Korsun-Shevchenkibsky: FOP Gavryshenko V.M., 2014. – 283 p. (Ukr)
9. *Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I., Geletukha G.G.*
Analysis of additional sources of wood fuel in Ukraine. UABio Position Paper № 15, 2016.
<http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-15-en.pdf>

Получено 14.04.2016
Received 14.04.2016

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ЗЕМЛИ: НОВАЯ ГИПОТЕЗА (ОБЗОР)**Басок Б.И.,** член-корр. НАН Украины, **Базеев Е.Т.**, канд. техн. наук*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Наведено основні положення нещодавно опублікованої гіпотези щодо наявності в ядрі планети стабільного джерела геотермальної енергії, яке раніше не розглядалося, а саме: термоядерної реакції особливого класу (пікноядерної реакції). Мотивом появилення гіпотези стало знайдене у результаті розрахункових і експериментальних досліджень значне розходження даних енергетичного балансу Землі. Нові уявлення щодо природи геотермальної енергії дають підставу для уточнення концепції абіогенного походження вуглеводнів (нафти, природного газу).

Представлены основные положения недавно опубликованной гипотезы о существовании в ядре планеты стабильного, ранее не рассматриваемого, источника геотермальной энергии, а именно: термоядерных реакций особого класса (пикноядерных реакций). Мотивом появления гипотезы послужило обнаруженное в результате расчётных и экспериментальных изысканий значительное расхождение данных энергетического баланса Земли. Новые представления о природе геотермальной энергии дают основания для уточнения концепции abiогенного происхождения углеводородов (нефти, природного газа).

The article presents the main provisions of the recently published hypothesis about the existence in core of the planet a stable, not previously considered, the source of geothermal energy – the thermonuclear reactions of a special class (pycnonuclear reactions). The motive for the appearance of the hypothesis was the discovery as a result of the calculated and experimental research considerable divergence of the energy balance data of the Earth. New ideas about the nature of geothermal energy give rise to refine the concept of abiotic origin of hydrocarbons (oil, natural gas).

Библ. 12, табл. 1.

Ключевые слова: новая гипотеза, геотермальная энергия, земное ядро, термоядерные реакции, происхождение углеводородов.

Результаты проведенных в мире новых исследований тепловых потоков в недрах Земли, в том числе и экспериментальных, позволили по иному взглянуть на природу внутренней энергии планеты и явились мотивом появления гипотезы по уточнению природы геотермальной энергии [1]. Ниже представлен краткий обзор работ, послуживших обоснованию новой гипотезы, и основные положения гипотезы.

В настоящее время природа геотермальной энергии установлена и является общепризнанной – это следствие радиоактивного распада элементов, содержащихся в земной коре (радиоактивных изотопов, таких как ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K). Рассматриваются гипотезы о наличии и других источников, генерирующих внутреннюю энергию Земли: приливное воздействие Луны, уплотнение мантии и др. [2].

Теоретическая (оценочная) величина теплового потока через земную поверхность определя-

ется зависимостью [1]:

$$F = dT/dr \lambda 4\pi R^2,$$

где $dT/dr = 0,025\dots0,030$ град/м (температурный коэффициент для глубины нескольких километров земной коры); $\lambda = 2$ Вт/м·град (коэффициент теплопроводности базальта верхнего слоя земной коры); R – радиус Земли (6371 км). Из приведенного выражения получаем $F = (28\dots31)$ ТВт.

Для уточнения расчетной величины теплового потока с 1939 года начали проводить и экспериментальные исследования. Впечатляют масштабы практических экспериментов по определению локальных тепловых потоков через земную поверхность: 20 тысяч пунктов (неглубокие скважины с измерением температурных коэффициентов и теплопроводности) по всему земному шару, в том числе и под дном океанов.

Мотивом появления гипотезы послужили результаты недавно проведенных при участии 15

университетов США, Западной Европы и Японии фундаментальных экспериментальных изысканий по определению величин тепловых потоков в недрах Земли, вызванных радиоактивным распадом вышеупомянутых изотопов. Обнаружилось значительное расхождение между количеством энергии, генерируемой вследствие распада радиоактивных изотопов, а также энергии

других (нерадиоактивных) источников, и суммой количества энергии, необходимой для поддержания магнитного поля Земли, а также энергии излучения через земную поверхность. В таблице представлены расчётные и экспериментальные данные энергетического баланса Земли (в итоговые показатели не включены расчётные значения тепловых потоков).

Таблица. Энергетический баланс Земли (тепловые потоки, ТВт)

| Расход энергии | Источник энергии |
|---|---|
| 1. Через поверхность Земли расчёт: 28...31 [1] эксперимент: 30 [2] $44,2 \pm 1$ [3] 46 ± 3 [4] принимается: 45 ± 1 [1] | 1. Радиоактивный распад изотопов расчет: 29-31 [1] эксперимент: 20 (238U, 232Th) [5] 4 (40K) [5] |
| 2. Поддержание магнитного поля Земли оценивается: 85 [1,6] | 2. Нерадиоактивные источники: уплотнение мантии и др. оценивается: 10 [2] |
| Итого 130 | Итого 34 |

Методические сложности измерений [1] заставляют усреднять полученные результаты разными коллективами исследователей и тепловой поток через поверхность Земли принимается равным 45 ± 1 ТВт ($1,5 \times 10^{21}$ Дж/год.). Эта энергия более чем на три порядка меньше энергии, получаемой Землёй от Солнца, хотя раньше, в XVIII веке, физики и климатологи считали, что климат зависит в основном от внутреннего тепла Земли. Недостающие по балансу ~ 100 ТВт теплового потока (табл.) призван обеспечивать иной мощный источник стабильный энергии. Этим источником не может быть изначальный запас земной энергии ядра планеты, ибо вследствие теплопроводности земной коры и мантии он не мог бы сохраниться даже на протяжении 100 млн. лет. Температура ядра должна была бы существенно снизиться, но согласно последним исследованиям, температура внутреннего ядра Земли примерно на 1000 К выше, чем предполагалось ранее, и составляет 6250 ± 500 К [1].

Выдвинута гипотеза о существовании ранее не рассматриваемого источника внутренней энергии Земли [1]. Предположено, что таким источником внутренней энергии Земли могут быть

термоядерные реакции особого класса (пинкноядерные реакции) в ядре планеты. Показана принципиальная возможность их протекания при низких и сверхнизких температурах, но при очень высоких плотностях вещества, указаны необходимые показатели для таких реакций и оценены имеющиеся условия (топливо, температура и давление) в недрах планеты для их осуществления. Заметим, что температуры, охарактеризованы как “низкие и сверхнизкие”, относительно температур, присущих термоядерным реакциям в разрабатываемых сейчас термоядерных энергостанках или реакциях, вероятно, происходящим в недрах планет-гигантов.

В качестве топлива рассматривается водород в химическом соединении с различными металлами (гидриды) [7;8]. Растворённый в металлах водород имеется как во внешнем, так и во внутреннем ядре Земли. Необходимая температура для реакций составляет диапазон $10^3 < T < 10^5$ К. Температура в ядре Земли, как отмечалось выше, по уточнённым данным оценивается в 6250 ± 500 К. Необходимое давление для реакций – $10^7 \dots 10^8$ бар. Давление в ядре Земли составляет 3×10^6 бар, но при крупных землетрясени-

ях (а их ежегодно бывает около 100) продольные сейсмические волны в локальных точках могут создавать давления в $10^7 \dots 10^8$ бар и более [1].

Таким образом, необходимые условия для протекания термоядерных (пинкоядерных) реакций имеются. В отдельных местах ядра Земли, как центрах термоядерных реакций, происходит разложение гидридов металлов с выделением водорода и вынос избытка тепла с газо-водородными потоками во внешние сферы и слои, ближе к поверхности Земли. Эти водородно-флюидные потоки, возникающие в ядре, являются источником тепловой энергии, многократно превосходящей суммарную энергию радиоактивного распада вышеупомянутых изотопов и создающей тот недостающий тепловой поток в 100 ТВт в энергетическом балансе Земли (табл.).

Новые представления о термоядерной природе геотермальной энергии согласно выдвинутой гипотезе позволяют не только уточнить природу и величину внутренней энергии Земли, но и уточнить концепцию происхождение углеводородов (нефти, природного газа).

Как известно, в разные периоды (начиная со средних веков) учёные при выяснении генезиса углеводородов полагались на разнообразные гипотезы как органического (биогенного) так и неорганического (абиогенного) происхождения углеводородов, в частности, нефти [9].

Постепенно к 70-м годам XX века ведущие позиции заняло направление, отстаивающее биогенную природу нефти (Международные конгрессы нефти 1963, 1967 и 1971 годов). Поиски углеводородов в мире проводились, исходя из представлений их органического происхождения. И хотя абиогенное происхождение нефти не получило общепринятого признания, всё же и в дальнейшем взгляд на абиогенную природу происхождения нефти отстаивался и продолжает отстаиваться рядом учёных [1].

Описанная гипотеза о термоядерной природе внутренней энергии Земли представляет следующим механизм абиогенного происхождение углеводородов. «Восходящие водородно-флюидные потоки вымывают углерод из глубин геосфер, перемещая его в самые верхние оболочки литосферы. Проявление такой тенденции приводило к тому, что в осадочном чехле планеты и покры-

вающих её водных бассейнах возрастала общая концентрация углерода, в результате формировались разнообразные соединения – от карбоновых толщин до скопления угля и углеводородов» [1]. При дегазации водорода из ядра планеты и при его попадании в обогащённые углеродом толщи будут протекать реакции гидрогенизации, формирующие нефтеносные слои и месторождения природного газа.

Новые представления о термоядерной природе внутренней энергии Земли позволяют уточнить существующие концепции о происхождении углеводородов и дают основания говорить об образовании нефти и газа в настоящее время и “до тех пор пока не иссякнут запасы водорода в земном ядре и не прекратятся термоядерные реакции”[1]. Не подтверждается ли это положение прогнозами постоянных сдвигов сроков обеспеченности запасов нефти и газа? Так, например, по прогнозу 1989 года срок обеспеченности запасов нефти составлял 41 год, природного газа – 58 лет [10]; прогноз 2012 года определяет такой срок соответственно в 40…45 лет и 60…70 лет [11].

Не исключается также, что из ядра планеты может выходить и чистый водород через трещины и разрывы в земляной коре. Случай выхода огромных количеств газов, содержащих водород и сам водород в чистом виде, геологам известны в прошлом [1]. Предложенная гипотеза даёт основание также рассматривать вопрос о возможности добычи чистого водорода из недр Земли. В этом случае для геологической науки может предстать проблема поиска и добычи водорода как топлива для промышленных целей.

Как отмечалось выше, в настоящее время преvalирует концепция биогенного происхождения углеводородов. Рассмотренная гипотеза уточняет представления сторонников их неорганического происхождения, давая основание утверждать, что “в принципе могут существовать два равноправных источника углеводородов” [1]. При этом подчёркивается, что источники абиогенного происхождения углеводородов повсеместно распространены в Земле, в то время как биогенные источники ограничены по запасам и сосредоточены географически в местах распространения древней флоры и фауны.

В Институте геологических наук НАН Украи-

ны проведены исследования, результаты которых меняют представления о ресурсном потенциале земных недр и, возможно, подтверждают abiогенную природу происхождения углеводородов. “Были получены реальные доказательства формирования зон интенсивного эндогенного рудообразования и нефтегазонакопления суперглубинных флюидов, связанных не только с верхней мантией, а и с нижней мантией и границей мантии и ядра. Это удалось сделать благодаря системному комплексному подходу к проблеме на основании результатов сейсмографических и разных минералогохимических исследований. Подъём флюидов из глубин геосферы Земли было независимо подтверждено открытием нового явления – наличия микро- и наночастиц самородных металлов и природных сплавов в коллекциях нефти и газа, в геотермальных рудах и т. п. Это коренным образом меняет наши представления о ресурсном потенциале земных недр и о закономерности нефтедогенеза и рудообразования. Три нефтегазоносных региона на территории Украины относятся к сверхглубоким осадочным бассейнам с аномально высокими мощностями осадочного типа. Глубокие горизонты этих бассейнов являются неисчерпаемыми источниками углеводородов, водорода, гелия, в т. ч. ^3He . Их освоение – это без преувеличения будущее нашей цивилизации” [12].

Как заключение отметим, что гипотеза о термоядерной природе внутренней энергии Земли носит дискуссионный характер. Представляется интересным проследить дальнейший ход обсуждения этой проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терез Э.И., Терез И.Э. Реакция синтеза – основной источник внутренней энергии Земли

- // Вестник Российской академии наук. – 2015. – Т. 85, №3.– С.240–246.
- 2. Anderson D.L. New Theory of the Earht. N.Y.: Cambridge U. Press, 2007.
- 3. Pollak H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. Heat Flow from the Earth’s Interior: Analysis of the Global Data Set // Reviews of Geophysics. 1993. – № 3.
- 4. Lay T., Hernlund J., Buffet B.A. Core-mantle boundary heat flow// Nature Geoscience. 2008. – V. 1. P 25–35.
- 5. Condo A., Condo Y., Ichimura K., et al. Partial Radiogenic Heat Model for Earth Revealed by Geoneutrino Measurements// Geoscience. 2011. – V. 4. P.647–651.
- 6. Баранов М.И. Приближённый расчёт магнитного поля Земли // Электротехника и электроника. 2010. – Т.6. С.46–48.
- 7. Ларин В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра, 1980.
- 8. Терез Э. И., Терез . И. Э. Термоядерные процессы в ядре – главный источник энергии геодинамической эволюции и дегазации Земли // Известия Крымской астрофизической обсерватории . 2011. – № 1.
- 9. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Т.1. Від вогню та води до електрики.– К., 2006. – 304с. Розділ 8. Нафта і газ. С.199–207.
- 10. Вольффберг Д. Б., Троицкий А. А. Основные итоги XIV конгресса Мировой энергетической конференции // Теплоэнергетика. 1990. № 2. – С.2–8.
- 11. Кондратов Д. И. Проблемы мирового рынка // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 7. – С. 616–626.
- 12. Із засідань Президії НАН України 2 грудня 2015 року//Вісник НАНУ. 2016. № 2. – С.13–17.

INTERNAL ENERGY OF THE EARTH: A NEW HYPOTHESIS (OVERVIEW)

Basok B.I., Bazyeev E.T.

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

The article presents the main provisions of the recently published hypothesis about the existence in core of the planet a stable, not previously considered, the source of geothermal energy – the thermonuclear reactions of a special class (pycnonuclear reactions). The motive for the appearance of the hypothesis was the discovery as a result of the calculated and experimental research considerable divergence of the energy balance data of the Earth. New ideas about the nature of geothermal energy give rise to refine the concept of abiotic origin of hydrocarbons (oil, natural gas).

References 12, tables 1.

Key words: hypothesis, source of geothermal energy, thermonuclear reactions, concept of abiotic origin of hydrocarbons.

1. Terez E.I., Terez I.E. Reaction of Synthesis is a Major Source of the Earth's Internal Energy. Vestnik RAN. – 2015. – T. 85, №3. – P.240 – 246.

2. Anderson D.L. New Theory of the Earth. N.Y.: Cambridge U. Press, 2007.

3. Pollak H.N., Hurter S.J., Johnson J.R. Heat

Flow from the Earth's Interior: Analysis of the Global Data Set. Rewiews of Geophysics. 1993. №3.

4. Lay T., Hernlund J., Buffer B.A. Core-mantle Boundary Heat Flow. Nature Geoscience. 2008. – V. 1. P.25–35.

5. Condo A., Condo Y., Ichimura K., et al. Partial Radiogenic Heat Model for Earth Revealed by Geoneutrino Measurements. Geoscience. 2011. – V.4. P.647–651.

6. Baranov M.I. An Approximation Calculation of the Earth's Magnetic Field. Elektrotehnika i elektronika. 2010. – T. 6. P.46–48.

7. Larin V.N. Hydridic Earth Theory. M.: Nedra, 1980.

8. Terez E.I., Terez I.E. Thermonuclear Processes in the Core – the Main Source of Energy of the Geodynamic Evolution and Degassing of the Earth. Izv. Krymskoj astrofisicheckoj observatorii. 2011. №1.

9. Energy: Past, Present and Future. V.1. From Fire and Water to Electricity. – K. 2006. – 304 p. Rozdil 8. Nafta i gas. P.199–207.

10. Wolfberg D.B., Troickij A.A. The Main Results of the Congress of the World Energy Conference. Teploenergetika. 1990. – №2. – P.2–8.

11. Kondratov D.I. The Problems of the World Market. Vestnik RAN. 2015. – T. 85. №7. – P.616–626.

12. From the meeting room of NAS Ukraine December 2, 2015. Visnyk NANU. 2016. – №2. – P.13–17.

Получено 16.06.2016
Received 16.06.2016