

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 37, № 1, 2015

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.  
Гелетуа 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)  
Вацлавик Ю. (Польша)  
Коверда В.П. (Россия)  
Коновалов В.И. (Россия)  
Люриг Х. (Германия)  
Маджамдар А. (Канада)  
Мартыненко О.Г. (Беларусь)  
Матеи И. (Румыния)  
Мизута И. (Япония)  
Минг-Шан-Жу (Китай)  
Накоряков В.Е. (Россия)  
Сайред Н. (Великобритания)  
Тоттен Дж. Е. (США)

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Долинський А.А., Шурчкова Ю.А., Дубовкіна І.О.,  
Коник А.В.

Дослідження впливу механізмів дискретно-імпульсного  
введення енергії на водневий показник водних систем.....5

Халатов А.А., Кобзарь С.Г., Дашевский Ю.Я.

Численное моделирование теплообмена и гидродинамики  
в круглой трубе с наклонно-тангенциальной закруткой  
потока на входе ..... 12

Басок Б.И., Кулінченко В.Р., Каптановський Д.В.

Взаємодія твердих і рідких фаз, рушійні сили розтікання,  
адгезія, змочування.....22

Авраменко А.А., Ковецкая М.М., Кондратьева Е.А.,  
Тыринов А.И.

Исследование режимов ухудшенного теплообмена  
при течении воды сверхкритических параметров  
в вертикальной трубе.....25

Круковский П.Г., Полубинский А.С., Тадля О.Ю.,  
Коваленко В.Н.

CFD-моделирование сопряженного паро- и влагопереноса  
в пористых строительных материалах.....32

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Ободович А.Н., Лымарь А.Н., Костик С.И.,  
Сидоренко В.В.

Снижение энергозатрат при переработке  
крахмалосодержащих сред методом дискретно –  
импульсного ввода энергии .....44

## НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Гелетуа Г.Г., Железная Т.А., Дроздова О.И.

Енергетический и экологический анализ технологий  
производства энергии из биомассы. Часть 2.....53

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ. СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

Прокопов В.Г.

Енергетическая эффективность зданий при  
использовании комбинированных систем  
теплоснабжения на основе газопотребляющих  
котлов и электрических систем прямого действия.....63

**Божко И.К., Лысенко О.Н., Гончарук С.М.,  
Калинина М.Ф.**

Пассивные дома в Украине и странах СНГ.....69

---

**ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

---

**Бабак В.П., Запорожець А.О., Редько О.О.**

Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу.....82

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
INSTITUTE OF ENGINEERING  
THERMOPHYSICS

## INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND  
APPLIED JOURNAL

Published bimonthly  
Founded in 1979

Volume 37, № 1, 2015

Editor in Chief – **A. DOLINSKY**

### Editorial Board Members:

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

### Advisory Editorial Board:

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

## CONTENTS

### HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES

- A. Dolinsky, J. Shurchkova, I. Dubovkina, A. Konyk**  
Research of influence of mechanisms of discrete-pulse input of energy on a ph-value of water..... 5
- A. Khalatov, S. Kobzar, Yu. Dashevskyy**  
Numerical simulation of heat transfer and hydrodynamics in round tube with inclined-tangential flow swirl at the inlet ..... 12
- B. Basok, V. Kulinchenko, D. Kaptanovskiy**  
Interaction of solid and liquid phases. Driving forces spreading, adhesion, moistening..... 22
- A. Avramenko, M. Kovetskaya, E. Kondratieva, A. Tyrinov**  
Research of modes of the worsened heat transfer for the flow of supercritical parameters in the vertical pipe..... 25
- P. Krukovsky, A. Polubinskiy, O. Tadlia, V. Kovalenko**  
CFD-simulation of coupled vapor and moisture transfer in porous building materials..... 32

### HEAT AND MASS EXCHANGE APPARATUS

- A. Obodovich, A. Lyamar, S. Kostyk, V. Sidorenko**  
Reduction of energy consumption in the processing of starch media by method of discret – pulsed energy input ... 44

### NONTRADITIONAL ENERGY SOURCES

- G. Geletukha, T. Zheliezna, O. Drozdova**  
Energy and ecology analysis of bioenergy technologies. Part 2..... 53

### ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS. BUILDING THERMOPHYSICS

- V. Prokopov**  
Energy efficiency in buildings with combined heating systems based on gas consuming boilers and electrical systems of direct action..... 63
- I. Bozhko, O. Lysenko, S. Goncharuk, M. Kalinina**  
Passive houses in Ukraine and countries of UIC..... 69

### MEASUREMENT, CONTROL, AUTOMATION OF THERMAL PROCESSES

- V. Babak, A. Zaporozhets, O. Redko**  
Increasing the accuracy of measuring the air excess coefficient in the boilers using the electrochemical gas analyzer..... 82

## Шановні передплатники!

Триває передплата на періодичні видання на 2015 рік через Державне підприємство по розповсюдженню періодичних видань «Преса», а також передплатної агенції «Укрінформнаука».

Оформити передплату на журнал «Промышленная теплотехника» (підписний індекс журналу – 74405) можна за «Каталогом видань України», «Каталогом видань зарубіжних країн» та каталогом «Газеты, Журналы» агентства «РОСПЕЧАТЬ» Російської Федерації у поштових відділеннях України та на сайті УДППЗ «Укрпошта» [www.ukrposhta.ua](http://www.ukrposhta.ua), а також скориставшись послугою «Передплата ON-LINE» на корпоративному сайті ДП «Преса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua).

Рукописи статей до журналу слід подавати у повній відповідності до «Вимог», які розміщені на сайті [www.ittf.kiev.ua](http://www.ittf.kiev.ua) у розділі – Журнал «Промышленная теплотехника».

Електронні адреси редакції – [shmorgun@ittf.kiev.ua](mailto:shmorgun@ittf.kiev.ua); [ihe@nas.gov.ua](mailto:ihe@nas.gov.ua).

**ПЕРЕДПЛАТИТЬ  
НАШЕ ВИДАННЯ  
на 2015 рік**

*У кожному поштовому  
відділенні України!  
А також на сайті  
[www.presa.ua](http://www.presa.ua)*

*Каталог  
видань  
України  
2015  
рік*  
Київ

УДК 536.423+532.528

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМІВ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА ВОДНЕВИЙ ПОКАЗНИК ВОДНИХ СИСТЕМ

Долінський А.А., академік НАН України, Шурчкова Ю.А., докт. техн. наук,

Дубовкіна І.О., докторант, Коник А.В., канд. техн. наук

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

У статті представлено дослідження активації водних систем методом ДІВЕ. Наведено результати експериментальних досліджень впливу механізмів ДІВЕ: миттєвого скидання тиску (вакуумування), адиабатичного закипання і високочастотних гідродинамічних коливань на водневий показник різних типів води. Встановлено степінь підвищення водневого показника і його стійкість в часі.

В статье представлены исследования активации водных систем методом ДИВЭ. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния механизмов ДИВЭ: мгновенного сброса давления (вакуумирование), адиабатического вскипания и высокочастотных гидродинамических колебаний на водородный показатель разных типов воды. Определена степень повышения водородного показателя, и его стойкость во времени.

Researches of activating of the water systems the method of DPIE are presented in the article. Results over of experimental researches of influence of mechanisms of DPIE are brought: instantaneous depressurization (vacuumizing), adiabatic boiling up and high-frequency hydrodynamic vibrations on the ph-value of different types of water. The degree of increase of ph-value and its stability throughout time is set.

Бібл. 8, рис. 4.

**Ключові слова:** дискретно-імпульсне введення енергії, скидання тиску, адиабатичне закипання, високочастотні гідродинамічні коливання, вода, водні системи.

ВЧГДК – високочастотні гідродинамічні коливання;

ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії;

ЕВС – експериментальний вакуумний стенд;

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

pH – водневий показник;

ТВО – термовакuumна обробка.

Стрімкий розвиток нанотехнологій викликає необхідність вивчення та дослідження процесів, що протікають на мікро- та нанорівнях: гідратація, активація та структуроутворення. Використання безреагентних методів, що дозволяють інтенсифікувати ряд технологічних процесів потребує особливої уваги, оскільки від них залежить підвищення якості готового продукту та зниження енергоспоживання.

З метою прискорення хімічних, фазових та інших перетворень доцільно застосовувати метод активації рідких середовищ (водних систем). Дослідження по активації води та водних систем в електричному і магнітному полі дозволили визначити суттєві можливості в області інтенсифікації процесів: дифузії, екстрагування, кристалізації, випарювання, абсорбції, ректифікації та ін. Використання в промисловості різних методів активації води, водних систем та водних

розчинів викликає значний інтерес і набуває суттєвого значення. Особливого наукового і практичного значення набувають питання вибору та оцінки методів активації, дослідження механізму фізичних явищ при активації і узагальнення отриманих експериментальних даних.

Активацію води та водних систем можна проводити різними способами: кавітаційно-кумулятивним впливом та ударними хвилями, механічною дезінтеграцією, впливом електричного чи магнітного полів, дегазацією, талою водою, швидко охолодженою кип'яченою водою, використанням електрогідроефекту, проникаючим випромінюванням і т.п.

Окрім сил хімічної взаємодії, що призводить до утворення валентних хімічних зв'язків між атомами (утворення молекул) існують додаткові сили взаємодії між молекулами. Енергія таких міжмолекулярних чи ван-дер-ваальсових взає-

модій на кілька порядків менша енергії ковалентного зв'язку. Наявність таких взаємодій принципово не змінює властивостей молекул. Між цими двома крайніми випадками існують взаємодії, проміжні за енергією, що призводять до утворення асоціатів. До числа таких асоціативних взаємодій належить водневий зв'язок [1]. Утворення водневого зв'язку відбувається при взаємодії протодонора (кислоти Бренстеда, електроноакцептора) з протонакцептором (основною, електронодонором).

Вода є унікальним розчинником. За фізичними характеристиками вода добре сольватує як недисоційовані молекули, так і вільні іони [2]. Крім того молекули води здатні до автопротолізу – передачі протона між молекулами однієї і тієї ж речовини. При утворенні водневих зв'язків виділяється теплота – термохімічна міра енергії Н-зв'язку.

В результаті проведених досліджень термодинамічних властивостей, світлорозсіювання і поглинання ультразвуку було встановлено, що активовані водні системи мають формальну схожість з кристалічними бінарними розплавами і можуть переходити із стану з неупорядкованою структурою в стан з упорядкованою структурою – в систему, в якій існує неперервна тривимірна сітка водневих зв'язків [3].

Загальним, що виявляється при експериментальному дослідженні різних методів активації води та водних систем є збільшення концентрації водневих іонів, а відповідно, і електричної провідності, при цьому стійкість активованої води складає від 4...5 діб до 60...70 хв., залежно від методу. У зв'язку з цим відбувається пошук нових методів, що можуть забезпечити стійкість активованих водних систем в часі.

Метою роботи є дослідження зміни водневого показника рН активованої води та водних систем безреагентним впливом – методом дискретно-імпульсного введення енергії, а саме використанням високочастотних гідродинамічних коливань, та скиданням тиску, що супроводжується адіабатичним закипанням.

В Інституті технічної теплофізики НАН України проводяться дослідження властивостей води та водних систем, активованих із застосуванням методу ДІВЕ: скиданням тиску в об'ємі,

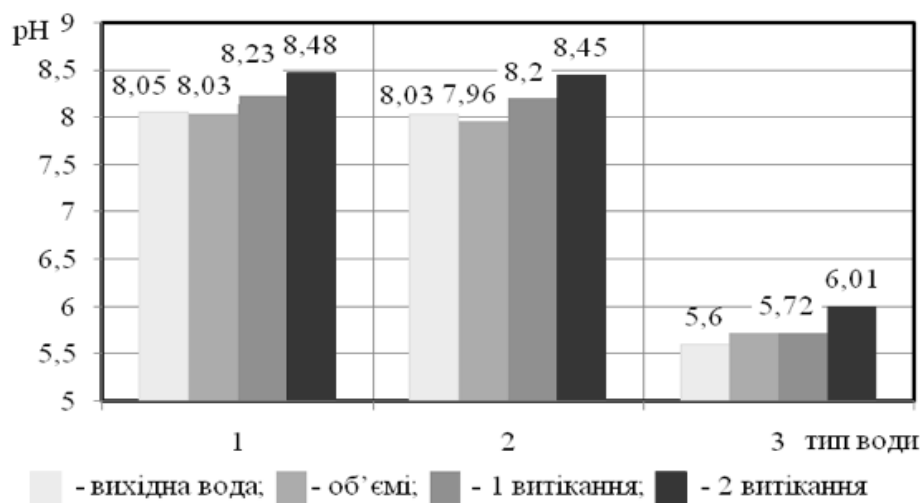
при витіканні через насадку, та обробкою високочастотними гідродинамічними коливаннями. Для досліджень в ІТТФ НАН України створено та застосовується експериментально-дослідне обладнання: експериментальний вакуумний стенд [4], термовакуумна обробка [5] і роторно-пульсаційний апарат [6].

ЕВС дозволяє проводити дослідження скидання тиску над поверхнею рідини в об'ємі та при витіканні через насадку. Вибір параметрів досліджень базується на основних умовах протікання процесу адіабатного закипання:  $T_{\text{води}} > T_{\text{кип}}(P)$ , оскільки, вода з температурою 60 °С закипає при тиску 20 кПа, то для досліджень було обрано діапазон скидання тиску від 98,1 кПа до 10...20 кПа і в діапазоні температури від 20 °С до 100 °С.

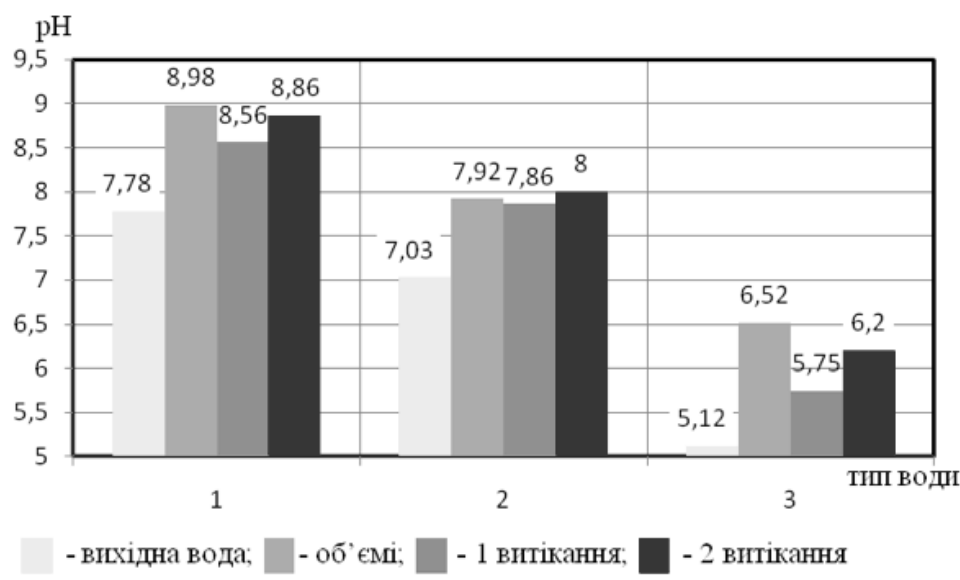
Дослідження скидання тиску проводились в об'ємі, для цього дослідний зразок розміщували у вакуумній камері, де відбувалось скидання тиску до заданої величини, після чого зразок витримували протягом 1 хвилини. Дослідження процесу витікання проводилось при пропусканні рідини через насадку у вакуумну камеру. Для досліджень зміни водневого показника рН активованих водних систем в якості модельних середовищ було обрано артезіанську, водопровідну і дистильовану воду. Результати дослідження процесу скидання тиску представлені на рис. 1 і на рис. 2 скидання тиску, що супроводжується адіабатичним закипанням, величина перегріву складає  $\Delta T = 15$ .

Представлені результати досліджень впливу скидання тиску на рН води підтверджують, що незалежно від типу води суттєве підвищення водневого показника (до 7,3 %) спостерігається при організації процесу дворазового витікання через насадку (рис. 1). Результати досліджень скидання тиску, що супроводжується адіабатичним закипанням вказують на підвищення водневого показника від 12 до 20 % (рис. 2). Максимальне підвищення рН води відбувається при скиданні тиску в об'ємі, де адіабатичне закипання середовища триває 1 хвилину. Необхідно зазначити, що рН отриманих зразків зберігається протягом 6 місяців.

Для дослідження впливу багаторазового скидання тиску на водневий показник води було ви-



**Рис. 1.** Зміна водневого показника в залежності від способу організації процесу скидання тиску ( $P = 10$  кПа,  $T = 20$  °С): 1 – водопровідна вода, 2 – артезіанська вода, 3 – дистильована вода.

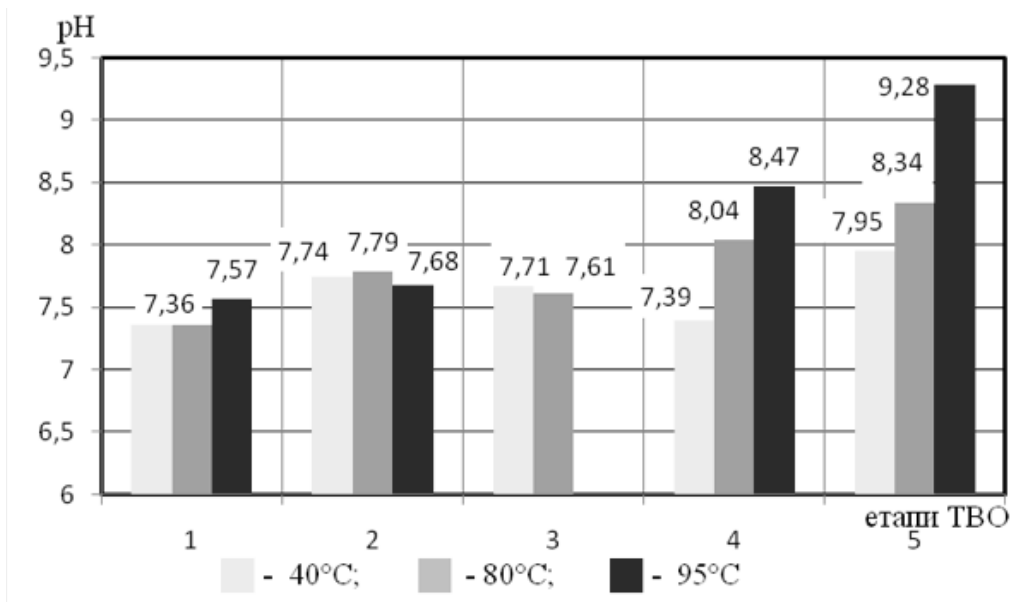


**Рис. 2.** Зміна водневого показника в залежності від способу організації процесу скидання тиску ( $P = 10$  кПа,  $\Delta T = 15$  °С): 1 – водопровідна вода, 2 – артезіанська вода, 3 – дистильована вода.

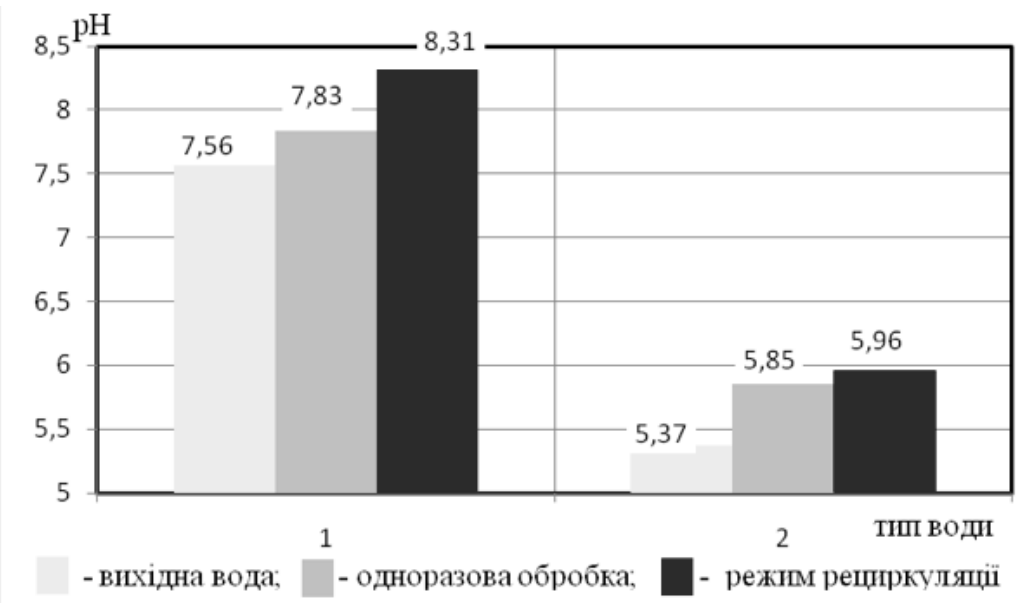
користано апарат адіабатичного закипання [5], що є основою термовакuumної технології. ТВО – це низка взаємозалежних процесів адіабатного закипання, конденсації, нагрівання, випаровування, охолодження, що протікають в імпульсному режимі зміни тиску і температури. Дослідження проводились при скиданні тиску від 98,1 кПа до 5 кПа в діапазоні температур від 10 °С до 95 °С. Зразки відбирались після кожного процесу при температурі 40, 80, 95 °С, щоб встановити степінь впливу температури пере-

гріву на рН модельного середовища. Необхідно зауважити, що процес адіабатного закипання відбувається при витіканні через насадку, а в якості модельного середовища було використано артезіанську воду.

З рис. 3 видно, що значне підвищення водневого показника спостерігається після етапу нагрівання. Необхідно зазначити, що чим вище температура перегріву  $\Delta T$ , тим вище значення рН, що свідчить про суттєвий вплив адіабатичного закипання, окрім цього, процес супровод-



**Рис. 3.** Зміна водневого показника води на різних етапах ТВО: 1 – вихідна вода, 2 – після конденсування, 3 – після нагрівання, 4 – після випаровування (закипання), 5 – після охолодження.



**Рис. 4.** Зміна водневого показника води в залежності від степені обробки та типу води: 1 – артезіанська вода, 2 – дистильована вода.

жується глибокою дегазацією при  $\Delta T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  вміст повітря складає  $0,7 \dots 0,8 \text{ см}^3/\text{л}$ , при  $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  близько  $0,1 \dots 0,15 \text{ см}^3/\text{л}$ .

Дослідження впливу ВЧГДК на рН води проводились на роторно-пульсаційному апараті, основним елементом якого є робочий вузол, що

складається з системи «ротор-статор-ротор» [6]. На роторах та статорі розташовані щільні зазори при перекритті яких відбувається різка зміна тиску від  $0,2 \text{ МПа}$  до  $0,001 \text{ МПа}$  і величина падіння тиску за секунду складає  $dP/dt = 0,6 \text{ ГПа/с}$ . РПА з величиною зазору

100 мкм в системі «ротор-статор-ротор» за розрахунковими даними приведеними в [7], має швидкість зсуву до  $2,35 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$  і напруження зсуву до 235,5 Па. Окрім цього розраховано, що елементарний об'єм перебуває в робочому вузлі  $69 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ , при цьому кількість коливань, що отримує елементарний об'єм при проходженні через робочий вузол становить 168...207. В якості модельних середовищ було обрано артезіанську і дистильовану воду.

В результаті проведених досліджень (рис. 4), було встановлено, що при одноразовій обробці рН підвищується від 3,5 %, та до 10,9 % в режимі рециркуляції відповідно.

### Висновки

За результатами експериментальних досліджень встановлено вплив адіабатичного закипання і високочастотних гідродинамічних коливань на зміну водневого показника модельних середовищ.

Отримані результати доводять доцільність застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії для активації водних систем, оскільки відбувається суттєва зміна водневого показника рН при різних методах впливу, так при миттєвому скиданні тиску до 7,3 %, при скиданні тиску, що супроводжується адіабатичним закипанням до 20 % на експериментальному вакуумному стенді. Дослідження адіабатичного закипання за термовакуумною обробкою свідчать про підвищення рН до 16 % в режимі імпульсної зміни тиску і температури та до 10,9 % в режимі рециркуляції при накладенні високочастотних гідродинамічних коливань.

Експериментальним шляхом було підтверджено, що отримане підвищення рН води зберігається протягом тривалого часу, наприклад, після термовакуумної обробки до 18 місяців, після роторно-пульсаційного апарату до 6 місяців.

Експериментальні дані розширюють уявлення про можливість зміни властивостей водних систем за рахунок зміни їх структури, а саме за рахунок утворення сітки водневих зв'язків, застосовуючи безреагентні методи

активації та впливу. В результаті обробки можна отримати воду з задалегідь заданими фізичними властивостями, без застосування хімічних речовин та домішок, що є важливим показником при приготуванні пива, соків, алкогольних і безалкогольних напоїв.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Москва В.В. Водородная связь в органической химии / Соросовский образовательный журнал – 1999. – № 2. – С. 58 – 64.

2. Дубовкіна І.О. Дослідження властивостей водних систем при обробці методом дискретно-імпульсного введення енергії та перспективи їх використання / Дубовкіна І.О., Шурчкова Ю.О. Третя науково-практична конференція з міжнародною участю «Вода в харчовій промисловості»: Збірник матеріалів Третьої науково-практичної конференції. – Одеса: ОНАХТ, 2012. – 116 с.

3. Вукс М.Ф., Шурупова Л.В. Молекулярная физика и биофизика водных систем / Журнал структурной химии. – 1971. – 12, № 4. С. 712 – 713, С. 730 – 731.

4. Шурчкова Ю.А., Сланік А.В. Опис експериментального вакуумного стенду для дослідження процесів миттєвого скидання тиску в об'ємі та при витіканні рідини // Збірник тез доповідей VIII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, С. 16 – 17.

5. Іваницький Г.К., Шурчкова Ю.А., Целень Б.Я., Сланік А.В. Сокращение энергетических затрат при обработке воды методом дискретно-импульсного ввода энергии // Сборник тезисов IV Межд. Науч.-практич. Конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов). СЕТТ - 2011», – Т.1. – С. 446 – 450.

6. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Сланік А.В. Микроструктура сухого остатка воды при различных способах её обработки // Пром. теплотехника. – 2009. – Т.31, №7. – С. 86 – 89.

7. Сланік А.В. Використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії для

обработки воды: дис. на здобуття наук. степеня кандидата технічних наук: 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика»/ А.В. Сланік. – Київ, 2010. – 190 с.

### RESEARCH OF INFLUENCE OF MECHANISMS OF DISCRETE-PULSE INPUT OF EN-ERGY ON A PH-VALUE OF WATER

**Dolinsky A.A., Shurchkova J.O.,  
Dubovkina I.O., Konyk A.V.**

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

Researches of activating of the water systems the method of discrete-pulse input of energy are presented in the article. Results over of experimental researches of influence of mechanisms of DPIE are brought: instantaneous depressurization (vacuumizing), adiabatic boiling up and high-frequency hydrodynamic vibrations on the pH-value of different types of water: artesian, distilled, tap water. Water with the physical properties set in good time, without application of chemicals and admixtures was received by DPIE method. The degree of increase of pH-value and its stability throughout time is set. It was confirmed by an experimental way that got step pH-value of water kept during great while. References 8, figures 4.

**Key words:** discrete-pulse input of energy, depressurization, adiabatic boiling up, high-frequency hydrodynamic vibrations, water, water systems.

8. *Долінский А.А., Шурчкова Ю.А.* Вода в условиях обработки ДИВЭ // Доповіді НАН України – 2013. – №8, – С. 35 – 39.

1. *Moskva V.V.* Hydrogen bond in organic chemistry / the Sorosovskyy educational magazine – 1999. – № 2. – P. 58 – 64 (Rus.)

2. *Dubovkina I.O.* Research of properties of the water systems at treatment a method discretely-impulsive introduction of energy and prospect of their use / Dubovkina I.O, Shurchkova Yu.O. Tretya naukovo-praktychna konferentsiya z mizhnarodnoyu uchastyu «Voda v kharchoviy promyslovosti»: Zbirnyk materialiv Tret'oyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. – Odesa: ONAKhT, 2012. – 116 p. (Rus.)

3. *Vuks M.F., Shurupova L.V.* Molecular physics and biophysics of the water systems / Zhurnal strukturnoy khymyy. – 1971. – 12, № 4. P. 712 – 713, P. 730 – 731 (Rus.)

4. *Shurchkova Yu.A., Slanik A.V.* Description of an experimental vacuum stand for research of processes of instantaneous depressurization in a volume and at the profluvium of liquid // Zbirnyk tez dopovidey VIII vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh. – P. 16 – 17 (Rus.)

5. *Yvanytskyi H.K., Shurchkova Yu.A., Tselen' B.Ya., Slanyk A.V.* Reduction of power expenses at treatment of discretely-impulsive energy input // Zbornyk tezysov IV Mezhd. Nauch.-Praktych. konferentsyy «Sovremenniye enerhosberhayushchiye teplovyye tekhnolohyy (sushka in termovlazhnostnaya obrabotka materyalov). SETT – 2011», – T. 1. – P. 446 – 450 (Rus.)

6. *Dolynskyy A.A., Shurchkova Yu.A., Slanyk A.V.* Microstructure of dry remain of water at the different ways of her treatment // *Prom. teplotekhnika*. – 2009. – Т. 31, № 7. – P. 86 – 89 (Rus.)

7. *Slanik A.V.* Use of mechanisms of discrete-pulse input of energy at treatment of water: *dys. na zdobuttya nauk. stepenya kandydata*

*tekhnichnykh nauk: 05.14.06 «Tekhnichna teplofyzyka ta promyslova teploenerhetyka»/ A.V. Slanik*. – Kyiv, 2010. – 190 p. (Rus.)

8. *Dolynskyy A.A., Shurchkova Yu.A.* Water is in the condition of treatment of DPIE // / *Dopovidi NAN Ukrayiny* – 2013. – № 8, – P. 35 – 39 (Rus.)

*Получено 01.10.2014*

*Received 01.10.2014*

УДК 532.516

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С НАКЛОННО-ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА НА ВХОДЕ

Халатов А.А.<sup>1,3</sup>, академик НАН Украины, Кобзарь С.Г.<sup>1</sup>, канд. тех. наук, Дашевский Ю.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

<sup>2</sup> ГП НПКГ «Зоря»-«Машипроект», пр. Октябрьский, 42а, Николаев, 54018, Украина

<sup>3</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ», Проспект Победы 37, Киев, 03056, Украина

Використовуючи пакет прикладних програм *ANSYS CFX* виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки та теплообміну в круглій трубі з нахильно-тангенціальним завихренням потоку на вході та 90° поворотом на виході. Виконано верифікацію двох груп моделей турбулентності, визначені основні параметри розрахункової сітки, які дозволяють отримати прийнятну точність розрахунків. Співставлення результатів розрахунків з експериментальними даними показало, що використання  $k-\omega$  моделі турбулентності дає кращі результати при розрахунку поверхневого кута завихрення потоку; всі моделі турбулентності добре розраховують коефіцієнт гідравлічного опору, а *LRR* модель напружень Рейнольдса найбільш точно описує теплообмін.

С использованием пакета прикладных программ *ANSYS CFX* выполнено компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в круглой трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока на входе и 90° поворотом на выходе. Выполнена верификация двух групп моделей турбулентности, определены основные параметры расчетной сетки, позволяющие получить приемлемую точность расчета. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что использование  $k-\omega$  модели турбулентности дает наилучшие результаты при расчете поверхностного угла закрутки потока; все модели турбулентности хорошо описывают коэффициент гидравлического сопротивления, а *LRR* модель напряжений Рейнольдса наиболее точно описывает теплообмен.

Based on the commercial software *ANSYS CFX* the computer simulation of heat transfer and hydrodynamics was performed in the round tube with incline-tangential flow swirl at the inlet and flow 90° turn at the exit. Two groups of turbulence models and basic parameters of the computer grid were verified allowing obtain the accepted accuracy. Comparison of predicted and experimental results showed that  $k-\omega$  turbulence model provides good agreement for the surface swirl angle, all tested models describes well the pressure drop coefficient, while *LRR* model of Reynolds stresses predicts precisely heat transfer data.

Библ. 10, табл. 4, рис. 6.

**Ключевые слова:** гидродинамика, закрученный поток, теплоотдача, наклонно-тангенциальная закрутка; модели турбулентности.

$d$  – диаметр цилиндрического канала, м;  
 $f$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $P$  – давление, Па;  
 $y^+$  – безразмерное расстояние от стенки до первой ячейки расчетной сетки;  
 $T$  – температура, К, °С;  
 $u, v, w$  – компоненты скорости потока по осям  $x, y, z$ , м/с;

$x, y, z$  – оси декартовой системы координат;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  
 $\phi$  – угол закрутки потока, градус;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\varepsilon$  – турбулентная диссипация;  
 $Nu$  – число Нуссельта;  
 $Re$  – число Рейнольдса.

### Введение

Закрученные течения широко применяют в технических устройствах для интенсификации процессов теплообмена и совершенствования

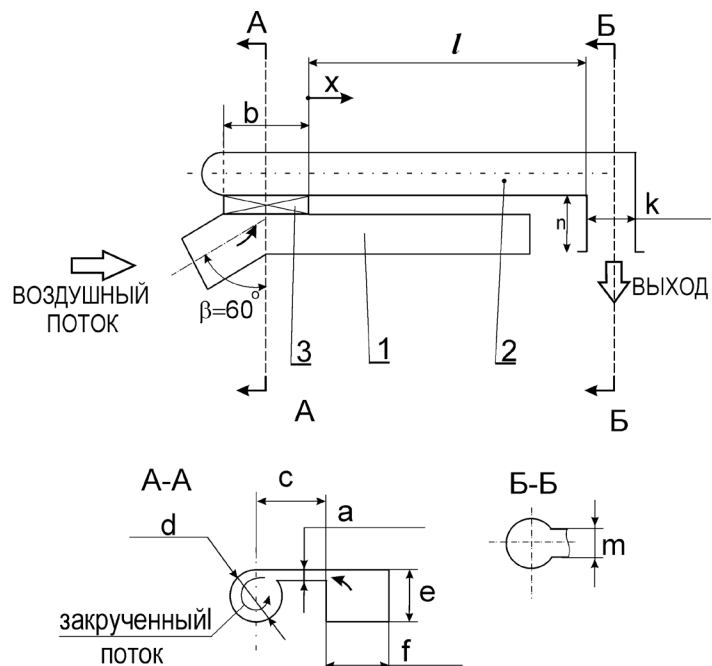
многих теплофизических процессов. Подавляющее большинство опубликованных исследований выполнены для условий классической тангенциальной закрутки потока, когда поток на

входе в трубу подается под углом  $90^\circ$  к ее продольной оси. В последние годы в связи с разработкой и исследованием внутреннего циклонного охлаждения лопаток газовых турбин самостоятельный интерес получила наклонно-тангенциальная закрутка, когда поток подается тангенциально и под углом к оси канала менее  $90^\circ$  в направлении движения потока. Большой цикл экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики в этом направлении представлен в работе [1]. Полученные результаты кроме самостоятельного значения могут служить основой для разработки более точных методов компьютерного моделирования закрученного потока с использованием современных коммерческих пакетов.

**Цель и задачи исследования.** С использованием коммерческого программного комплекса *Ansys CFX* выполнить компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в круглой трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока и  $90^\circ$  поворотом на выходе. На основе сравнения с результатами экспериментального исследования [1, 9, 10] определить адекватные модели турбулентности и получить новые данные в области, прилегающей к наклонно-тангенциальному завихрителю.

#### Объект исследования и компьютерная модель

В качестве объекта исследований использован круглый канал с внутренним диаметром 20 мм (рис. 1), исследованный экспериментально в работе [1]. Исследуемая геометрия была построена в декартовой системе координат. При компьютерном моделировании использовалась неструктурированная комбинированная расчетная сетка, построенная при помощи сеточного генератора *ANSYS CFX Mesh.*, которая представляет собой комбинацию тетраэдральных элементов в области основного потока с призматическими элементами в области сгущения расчетной сетки около твердой поверхности канала. Согласно рекомендациям разработчика программы *ANSYS CFX*, количество слоев призматических элементов около стенки должно быть не меньше 10. На предварительной стадии было выполнено исследование влияния способа задания сгущения сетки около твердой стенки канала на ее качество. Перебор методов создания сгу-



**Рис. 1. Геометрическая модель объекта исследования [1]: 1 – распределительный канал; 2 – тангенциальный завихритель; 3 – основной цилиндрический канал.**

**Основные размеры:**  $a = 5$  мм;  $b = 59$  мм;  $c = 30$  мм;  $d = 20$  мм;  $e = 20$  мм;  $f = 25$  мм;  $k = 40$  мм;  $l = 231$  мм;  $m = 15$  мм;  $n = 40$  мм.

щения сетки около стенки канала показал, что наиболее оптимальным способом задания сгущения является метод *Максимальная толщина слоя*, причем значение максимальной толщины должно быть равным  $0,0005$  м ( $0,025$  диаметра канала). Исследуемая геометрия построена в среде *ANSYS Design Manager*, общий вид 3D компьютерной модели показан на рис. 2.

Анализ опубликованных данных показал [2-7], что для расчета закрученного течения в круглом канале хорошие результаты демонстрируют две группы моделей турбулентности. Первая из них включает модели  $k$ - $\epsilon$ , *RNG*  $k$ - $\epsilon$  и *LRR* модель напряжений Рейнольдса, использующие масштабируемые пристеночные функции. При использовании этой группы в расчетах применялась сетка с параметрами, которые приведены в таблице 1, причем значение  $y^+$  не превышало 40. Вторая группа моделей турбулентности состоит из моделей  $k$ - $\omega$  и *SST*, которые используют *автоматические пристеночные функции*.

Табл. 1. Параметры расчетной сетки

Параметры сетки		Класс моделей турбулентности	
		Масштабируемые пристеночные функции	Автоматические пристеночные функции
Сгущение около стенки	Максимальная толщина слоя, м	5,0 е-4	5,0 е-4
	Количество слоев, ед.	15	17
	Фактор роста	1,2	1,3
Максимальный размер ячейки на поверхностях, м		2,0 е-3	2,0 е-3
Максимальный размер ячейки, м		2,0 е-3	2,0 е-3
Количество элементов		808325	874863
Количество узлов		1694651	1861029

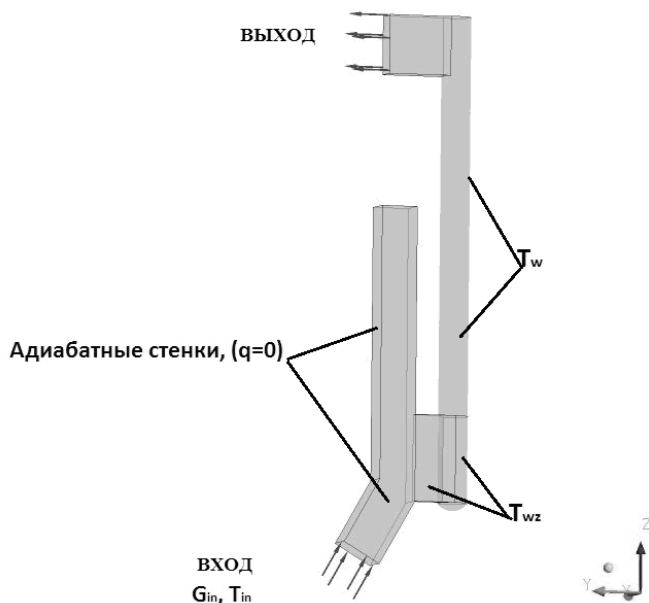


Рис. 2. Компьютерная 3D-модель объекта исследования и схема постановки граничных условий.

Для данной группы использовалась расчетная сетка с параметрами, которые приведены в таблице 1, при этом значение  $y^+$  не превышало 1,0.

**Физическая модель и граничные условия**

При анализе моделей турбулентности были использованы результаты экспериментов по гидродинамике [1, 9] и теплообмену [1, 10] закрученного потока в трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока и 90° поворотом на выходе, которые характеризуются высокой степенью по-

вторяемости. Рассмотрен случай теплообмена от нагретого воздушного закрученного потока к охлаждаемой стенке. Среднерасходное число Рейнольдса в обоих случаях составляло 100000, что практически соответствует реальным условиям внутреннего охлаждения лопаток газовых турбин.

Схема постановки граничных условий задачи представлена на рис. 2, перечень граничных условий приводится в таблице 2. На выходе из расчетной области (за выходным поворотом) задавалось атмосферное статическое давление равное 101325 Па.

Табл. 2. Граничные условия

Расход воздуха $G_{in}$ , г/с	32,28
Температура воздуха $T_{in}$ , °C	97
Температура стенки завихрителя $T_{wz}$ , °C	30
Температура стенки цилиндрического канала $T_w$ , °C	20

Воздух считался идеальным газом с теплофизическими свойствами, зависящими от температуры. В частности, зависимость теплоёмкости при постоянном давлении от температуры задавалась полиномиальной зависимостью вида [8]:

$$\frac{C_p}{R} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $a_0... a_4$  – коэффициенты полинома [8].

Зависимость коэффициента динамической вязкости и теплопроводности воздуха от температуры задавались формулами Сазерленда [8]:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \frac{T_0 + C_s}{T + C_s}, \quad \lambda = \lambda_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \frac{T_0 + C_{s1}}{T + C_{s1}},$$

где  $\mu_0$ ,  $\lambda_0$  – базовые значения коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности соответственно;  $T_0 = 273,15$  К базовое значение температуры воздуха.

Осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса решались для вязкого теплопроводного газа в стационарной постановке, при расчете теплообмена использовано полное уравнение сохранения энергии.

### Результаты моделирования

Как указывалось выше, при компьютерном моделировании были использованы две группы моделей турбулентности – модели с автоматическими пристеночными функциями (*SST* и *k- $\omega$* ) и с масштабируемыми пристеночными функциями (*k- $\epsilon$* , *RNG k- $\epsilon$* , *LRR* модель напряжений Рейнольдса – *LRR-RSM*). Сравнение расчетных и экспериментальных результатов проводилось по углу закрутки потока вблизи стенки канала, коэффициенту гидравлического сопротивления и числу Нуссельта  $Nu_d$ .

Угол закрутки потока в цилиндрическом канале определялся путем обработки рассчитанного поля скорости в *CFX-post*, при помощи созданной пользовательской переменной. Для декартовой системы координат тангенс угла закрутки определялся согласно формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\sqrt{w^2}}. \quad (1)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления определялся соотношением:

$$f = \frac{\Delta P^*}{\Delta x} d \frac{2}{\rho w_{cp}^2}, \quad (2)$$

где  $w_{cp}$  – среднерасходная осевая скорость потока в канале. При использовании стандартной функции *CFX-post* для определения коэффициента теплоотдачи, в случае использования моделей турбулентности с автоматическими пристеноч-

ными функциями, результаты расчета числа Нуссельта получаются завышенными в несколько раз. В этом случае целесообразно использовать экспертный параметр  $T_{bulk}$ , который используется в функции *CFX-post* в качестве определяющей температуры потока. Также возможен вариант расчета осредненного коэффициента теплоотдачи, используя рассчитанный компьютерной программой тепловой поток и коэффициент теплоотдачи:

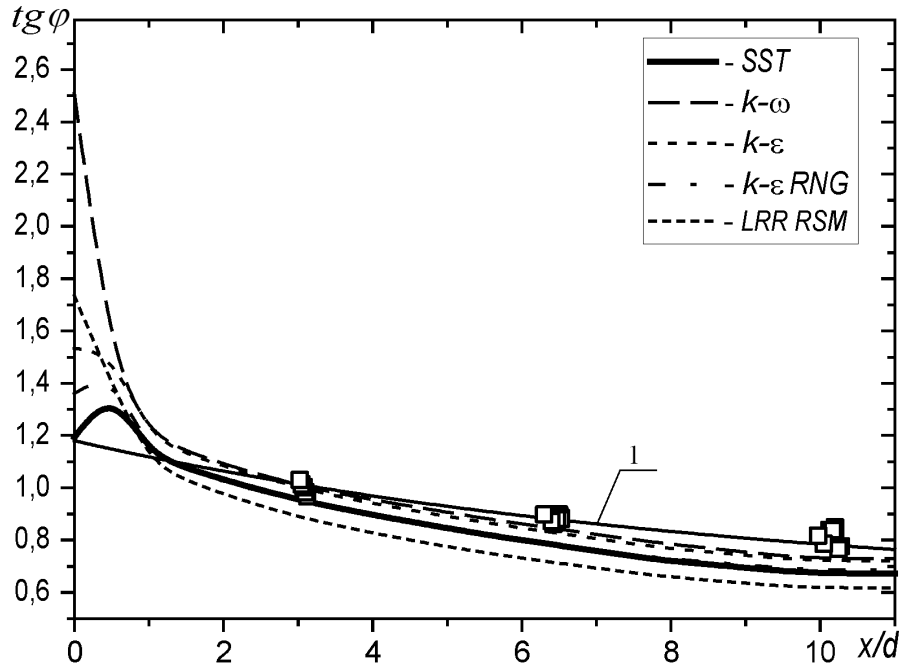
$$\alpha = \frac{[\text{areaAve}(\text{Wall Heat Flux})@\text{User Surface 1}]}{[\text{areaAve}(\text{Temperature})@\text{Plane 1} - \text{areaAve}(\text{Temperature})@\text{User Surface 1}]}, \quad (3)$$

здесь: *Plane 1* – выбранное поперечное сечение верхность расчетной области, которая образована пересечением поперечного сечения *Plane 1* со стенкой канала.

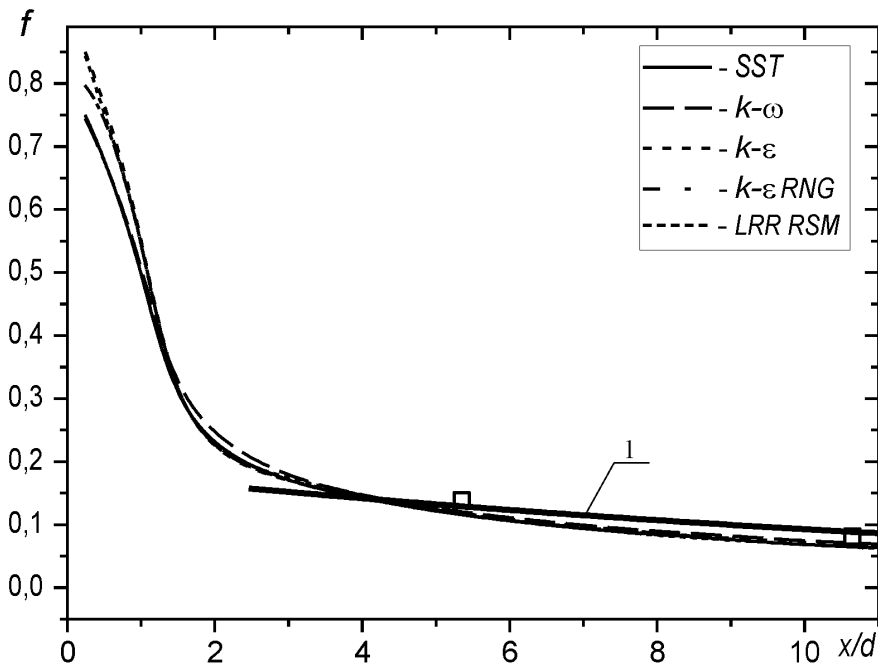
Результаты расчета изменения поверхностного угла закрутки потока, коэффициента гидравлического сопротивления и локального числа Нуссельта по длине канала представлены на рис. 3 – 6. Начало отсчета соответствует выходному «срезу» тангенциальной щели, направление оси  $x$  показано на рис. 1.

На рис. 3 приведены результаты расчета и экспериментальных измерений поверхностного угла закрутки потока [1, 9]. Как следует, аппроксимированное на начало координат значение этого угла составляет около  $50^\circ$ , тогда как его геометрическое значение равно  $30^\circ$  (рис. 1). Это обусловлено перестройкой потока еще до входа потока в щель тангенциального завихрителя.

Сравнение показывает (рис. 3), что в области  $x/d > 2,0$  все модели с автоматическими и масштабируемыми пристеночными функциями достаточно хорошо описывают изменение этого параметра, но наилучшие результаты показывает *k- $\omega$*  модель турбулентности. Некоторая неопределенность в определении угла закрутки имеет место в области  $0 < x/d < 1,5 \dots 2,0$ , где наблюдается значительное расхождение результатов расчета. В первом приближении можно принять, что наиболее адекватные результаты демонстрирует *SST* – модель турбулентности, данные которой при  $x = 0$  соответствуют экспериментальным значениям угла закрутки, аппроксимированным



**Рис. 3. Продольное изменение значения тангенса угла закрутки:**  
 □ – эксперимент [9]; 1 – кривая аппроксимации экспериментальных данных [9].



**Рис. 4. Продольное распределение коэффициента гидравлического сопротивления:**  
 □ – эксперимент [9]; 1 – кривая аппроксимации экспериментальных данных [9].

на начало координат. Что касается экстремального поведения этой кривой в области  $x/d < 1,5$ , то это может быть обусловлено перестройкой структуры потока внутри канала.

На рис. 4 представлено сравнение расчетных

и экспериментальных данных по коэффициенту гидравлического сопротивления. В области  $x/d > 3,0$  все модели турбулентности дают примерно одинаковые результаты и хорошо согласуются с экспериментальными данными [9] и

аппроксимирующей кривой полученной в работе [9]. В области  $x/d < 3,0$  наблюдаются значительный рост потерь полного давления, что объясняется перестройкой структуры потока в области сразу после завихрителя. В качестве коэффициента гидравлического сопротивления  $f$  при  $x = 0$  можно принять среднее значение равное 0,85.

На рис. 5, 6 представлены результаты расчета локального числа Нуссельта. Для моделей с автоматическими пристеночными функциями расчет выполнен с использованием экспертного параметра  $T_{bulk}$ , который используется пакетом *CFX* в качестве определяющей температуры потока (при расчетах этот параметр задавался рав-

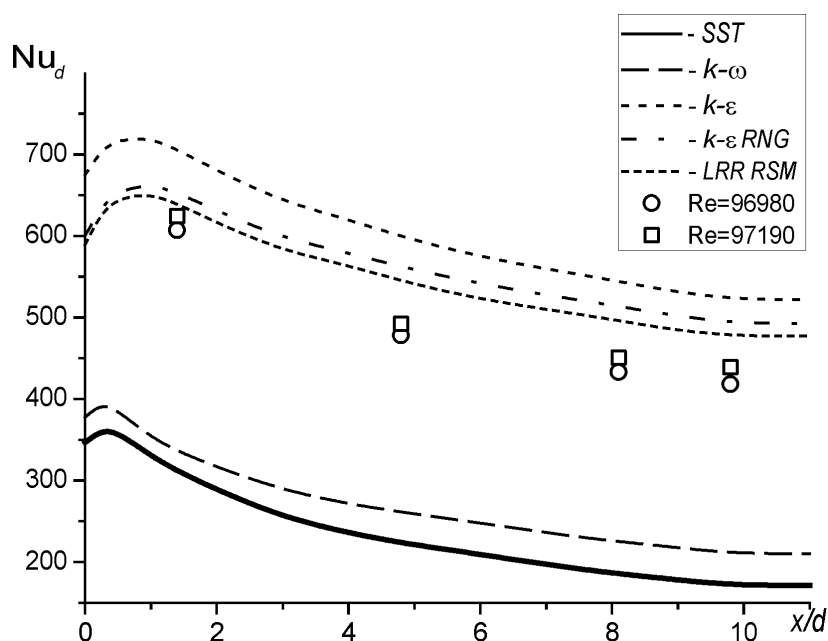


Рис. 5. Продольное распределение локального числа Нуссельта. Точки – экспериментальные данные работы [10].

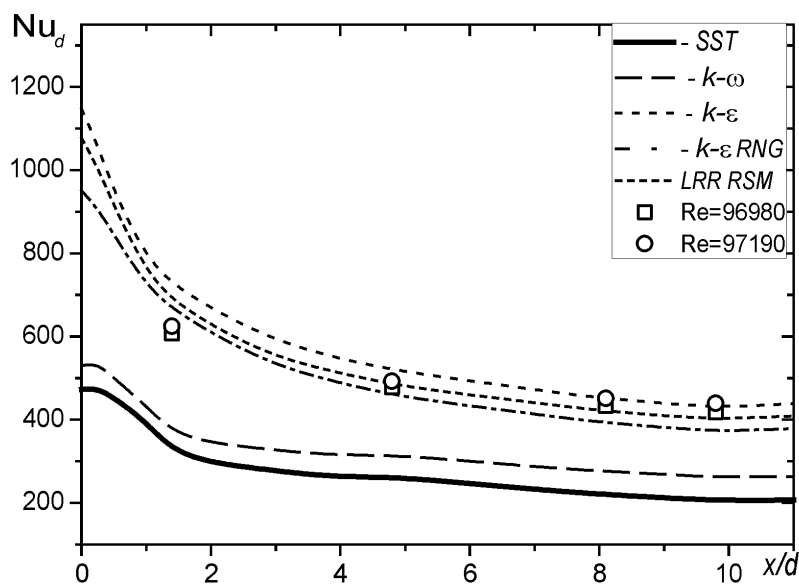


Рис. 6. Продольное распределение локального числа Нуссельта. Точки – экспериментальные данные работы [10].

ным средней температуре потока в трубе). Для моделей с масштабируемыми пристеночными функциями число Нуссельта рассчитывалось по коэффициенту теплоотдачи, полученному стандартными средствами *CFX-post*.

Анализ результатов приведенных на рис. 5, показывает, что для закрученного потока в трубе модели турбулентности с автоматическими пристеночными функциями дают существенно заниженное значение числа Нуссельта, в то время как модели с масштабируемыми пристеночными функциями (*RNG k-ε*; *LRR RSM*) показывают удовлетворительную точность.

На рис. 6 приведены результаты расчета числа Нуссельта с использованием коэффициента теплоотдачи рассчитанного по выражению (3). Применение такого подхода позволило повысить точность расчета теплоотдачи с использованием моделей с автоматическими пристеночными функциями, но достигнутая точность является не удовлетворительной. В тоже время результаты расчета теплоотдачи, которые получены с использованием модели напряжений Рейнольдса (*LRR-RSM*) дают хорошее согласование с экспериментальными данными в области  $x/d > 1,5$ . Полученные результаты также показывают значительный рост теплообмена в области  $x/d < 1,5$ .

**Потери в завихрителе и в выходном повороте**

Компьютерное моделирование позволило определить гидравлические потери в наклонно-тангенциальном завихрителе, а также в выходном 90° повороте. Коэффициент гидравлического сопротивления завихрителя определялся соотношением:

$$\zeta_z^* = \frac{\Delta P^*}{\rho_{ш} \frac{\bar{w}_{ш}^2}{2}}, \quad (4)$$

где  $\Delta P^*$  – разность полных давлений перед завихрителем и в сечении трубы за завихрителем на расстоянии  $x/d = 1,5$  от выходного «среза» тангенциальной щели (как это было принято в работе [8]);  $w_{ш}$ ,  $\rho_{ш}$  – среднемассовая скорость и плотность воздуха в щели завихрителя.

Коэффициент гидравлического сопротивления выходного поворота определялся по соотношению:

$$\zeta_{tum}^* = \frac{\Delta P_{tum}^*}{\rho_{cp} \frac{w_{cp}^2}{2}}, \quad (5)$$

где  $\Delta P_{tum}^*$  – разность полных давлений перед поворотом и на выходе из него;  $w_{cp}$ ,  $\rho_{cp}$  – среднемассовая скорость потока в канале и плотность в цилиндрическом канале на входе в поворот.

Результаты сравнения коэффициента гидравлического сопротивления завихрителя при использовании различных моделей турбулентности представлены в таблице 3. Эти данные показывают, что наилучшее согласование расчета с экспериментом демонстрирует *LRR* модель напряжений Рейнольдса. Относительная погрешность расчета составляет 9,4 %. Что касается потерь полного давления в самой щели тангенциального завихрителя, то, используя данные, представленные на рис. 4 и в таблице 2, можно получить, что коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta_z^{**}$  составляет 2,01. Здесь  $\zeta_z^{**} = 2 \Delta P_{ш}^* / (\rho_{ш} w_{ш}^2)$ .

Результаты расчета коэффициента гидравлического сопротивления выходного поворота представлены в таблице 4. Эти данные показывают, что наилучшее согласование расчетных данных с экспериментом получено при использовании *k-ω* модели турбулентности. Относительная погрешность расчета в этом случае составляет 9,14 %. В целом, более высокая погрешность

Табл. 3. Результаты расчета коэффициента сопротивления завихрителя

Модель турбулентности	Расчет	Эксперимент [8]	Относительная погрешность, %
<i>k-ε</i>	2,757	<b>3,086</b>	10,6
<i>k-ε-RNG</i>	2,754		10,75
<i>k-ω</i>	2,711		12,1
<i>SST</i>	2,775		10,07
<b>LRR-RSM</b>	<b>2,796</b>		<b>9,4</b>

Табл. 4. Результаты расчета коэффициента сопротивления выходного поворота  $\zeta_{turn}^*$ 

Модель турбулентности	Расчет	Эксперимент [8]	Относительная погрешность, %
$k-\varepsilon$	0,8384	<b>0,703</b>	19,2
$k-\varepsilon-RNG$	0,8655		23
<b><math>k-\omega</math></b>	<b>0,7673</b>		<b>9,14</b>
<i>SST</i>	0,7925		12,7
<i>LRR-RSM</i>	0,796		13,2

расчета коэффициента сопротивления выходного поворота, может быть обусловлена различием в задании величины статического давления на выходе из расчетной области и статического давления на выходе из участка поворота, наблюдаемого в экспериментах. Эти данные в работе [9] не приводятся.

### Выводы

1. С использованием пакета прикладных программ *ANSYS CFX* выполнено компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока и  $90^\circ$  поворотом на входе. В расчетах использованы две группы моделей турбулентности – с автоматическими пристеночными функциями (*SST* и  $k-\omega$  модели) и с масштабируемыми пристеночными функциями ( $k-\varepsilon$ , *RNG*  $k-\varepsilon$ , *LRR-RSM* модели).

2. Определены параметры расчетной сетки, при которых пакет прикладных программ *ANSYS CFX* позволяет получить приемлемую точность расчета гидродинамики и теплообмена в трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока.

3. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало, что:

- наилучшие результаты при расчете поверхностного угла закрутки потока в области  $x/d > 2,0$  дает использование  $k-\omega$  модели турбулентности;

- все модели турбулентности показывают примерно одинаковые и хорошо согласующиеся с экспериментом результаты расчета гидравлического сопротивления в области  $x/d > 3,0$ ;

- наилучшие результаты при расчете локального теплообмена во всей области канала получены при использовании *LRR* модели напряжений Рейнольдса;

- при расчете коэффициента гидравличес-

кого сопротивления наклонно-тангенциального завихрителя наилучшее согласование с экспериментом демонстрирует *LRR* модель напряжений Рейнольдса, а при расчете коэффициента гидравлического сопротивления выходного поворота –  $k-\omega$  модель турбулентности.

4. Получены новые данные, характеризующие некоторые особенности гидродинамики и теплообмена около наклонно-тангенциального завихрителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин/ Халатов А.А., Романов В.В., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Северин С.Д. / Изд. Института технической теплофизики НАН Украины. – Киев. – 2010. – 317 с.
2. John P.C.W. Ling, Peter T. Ireland, Neil. W. Harvey. Measurement of Heat Transfer Coefficient Distributions and Flow Field in a Model of a Turbine Blade Cooling Passage with Tangential Injection // ASME Paper # GT2006-90352.
3. Zhao LIU, Zhen Ping FENG, Liming Song. Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirl Cooling on Leading Edge Model of Gas Turbine Blade // ASME Paper # GT2011-46125.
4. Hay, N., & West, P.D., 1975, "Heat Transfer in Free Swirling Flow in a Pipe," ASME Journal of Heat Transfer, P. 411 – 416.
5. Andreas Lerch, Heinz-Peter Schiffer, Daniela Klaubert. Impact on Adiabatic Film Cooling Effectiveness Using Internal Cyclone Cooling // ASME Paper GT2011-45120.
6. D.W. Stephens, K. Mohanarangam. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone // Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne.

ne, Australia. – 9-11 December, 2009.

7. *Ali M. Jawarneh, Hitham Tlilan, Ahmad Al-Shyyab, Amer Ababneh.* Strongly swirling flows in a cylindrical separator//Minerals Engineering 21 (2008)/ P. 366 – 372.

8. *Introduction to Thermal Science/Shmidt F., Henderson R., Wolgemuth C./ John Wiley&Son.* – New York. – 1984. – 445 p.

9. *Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Северин С.Д.* Гидродинамика закручен-

ного потока в трубе с наклонно-тангенциальной закруткой потока и 90°-поворотом на выходе // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, №6. – С. 6 – 13.

10. *A. Khalatov, I. Borisov, S. Severin, V. Romanov, V. Spitsyn, Yu. Dashevskyy.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling // Proc. of ASME Turbo Expo 2011. – GT2011-45150. – 9 p.

## NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER AND HYDRODYNAMICS IN ROUND TUBE WITH INCLINED-TANGENTIAL FLOW SWIRL AT THE INLET

**Khalatov A.A.<sup>1,3</sup>, Kobzar S.G.<sup>1</sup>, Dashevskyy Yu. Y.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Zhelyabova str., Kiev, 03680, Ukraine

<sup>2</sup> GP NPKG «Zorya»-Mashproekt», 42a, Pr. Oktyabrskiy, Nikolev, 54018, Ukraine

<sup>3</sup> The National Technical University «KPI», 37 Pobedi Avenue, Kiev, 03056, Ukraine

Based on the commercial software *ANSYS CFX* the computer simulation of heat transfer and hydrodynamics was performed in the round tube with incline-tangential flow swirl at the inlet and flow 90° turn at the exit. Two groups of turbulence models and basic parameters of the computer grid were verified allowing obtain the accepted accuracy. Comparison of predicted and experimental results showed that *k- $\omega$*  turbulence model provides good agreement for the surface swirl angle, all tested

models describes well the pressure drop coefficient, while *LRR* model of Reynolds stresses predicts precisely heat transfer data. References 10, tables. 4, figures 6.

**Key words:** hydrodynamics, swirling flow, heat transfer, inclined-tangential flow swirl, turbulence models.

1. *Heat transfer and hydrodynamics at cyclone cooling of gas turbine blades / Khalatov A.A., Romanov V.V., Borisov I.I., Dashevskyy Yu.Y., Severin S.D. / Institute for Engineering Thermophysics. National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv. – 2010. – 317 p. (Rus.)*

2. *John P.C.W. Ling, Peter T. Ireland, Neil W. Harvey.* Measurement of Heat Transfer Coefficient Distributions and Flow Field in a Model of a Turbine Blade Cooling Passage with Tangential Injection // ASME Paper # GT2006-90352.

3. *Zhao LIU, Zhenping FENG, Liming Song.* Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Swirl Cooling on Leading Edge Model of Gas Turbine Blade // ASME Paper # GT2011-46125.

4. *Hay, N., & West, P. D.* Heat Transfer in Free Swirling Flow in a Pipe// ASME Journal of Heat

Transfer. – 1975. – P. 411 – 416.

5. *Andreas Lerch, Heinz-Peter Schiffer, Daniela Klaubert.* Impact on Adiabatic Film Cooling Effectiveness Using Internal Cyclone Cooling // ASME Paper GT2011-45120.

6. *D.W. Stephens, K. Mohanarangam.* Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone // Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia. – 9-11 December 2009.

7. *Ali M. Jawarneh, Hitham Tlilan, Ahmad Al-Shyyab, Amer Ababneh.* Strongly swirling flows in a cylindrical separator//Minerals Engineering. – 2008. – v.21. – P. 366 – 372.

8. *Introduction to Thermal Science/Shmidt F., Henderson R., Wolgemuth C./ John Wiley&Son.- New York. – 1984. – 445 p.*

9. *A. Khalatov, I. Borisov, Yu. Dashevsky, S. Severin.* Hydrodynamics of the swirled flow in the tube with the obliquely-tangential flow swirl and 90 degrees outlet channel bend // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2009. – vol. 31, № 6. – P. 6 – 13. (Rus.)

10. *A. Khalatov, I. Borisov, S. Severin, V. Romanov, V. Spitsyn, Yu. Dashevskyy.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling // Proc. of ASME Turbo Expo 2011. – GT2011-45150. – 9 p.

*Получено 05.06.2014*

*Received 05.06.2014*

УДК 664.126

## ВЗАЄМОДІЯ ТВЕРДИХ І РІДКИХ ФАЗ, РУШІЙНІ СИЛИ РОЗТІКАННЯ, АДГЕЗІЯ, ЗМОЧУВАННЯ

**Басок Б.І.<sup>1</sup>**, член-кореспондент НАН України, **Кулінченко В.Р.<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, **Каптановський Д.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03680*

<sup>2</sup> *Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01033*

<sup>3</sup> *Черкаський державний технологічний університет, бульвар Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси*

Авторами проаналізовані основні рівняння молекулярної теорії капілярності і умови їх використання при незворотних процесах змочування. Встановлено, що рівняння Юнга, Дюпре, Лапласа і Кельвіна при незворотних процесах взаємодії рідких фаз, що конденсуються, та твердих фаз, не можна використовувати, бо вони виведені в умовах зворотного ізотермічного процесу і визначаються дією міжмолекулярних сил.

Авторами выполнен анализ основных уравнения молекулярной теории капиллярности и условия их использования при необратимых процессах смачивания. Установлено, что уравнение Юнга, Дюпре, Лапласа и Кельвина при необратимых процессах взаимного действия жидких фаз, которые конденсируются и твердых фаз, нельзя использовать, потому что они выведены в условиях обратимого процесса и подчинены действию молекулярных сил.

The authors analyzed the molecular theory basic equation of capillarity and conditions for their using in irreversible wetting processes. It was established that Young's equation, Dupre's equation, Laplace's equation and Kelvin's equation in mutual action irreversible processes of liquid phases, which are condensed and solid phases, can not be used because they (equations) are derived in a reversible process and subjected to the action of the molecular forces.

Бібл. 5.

**Ключові слова:** капілярність, змочування, фаза, незворотний процес, ізотермічний процес.

$F$  – сила розтікання, Н;

$W$  – робота, Дж;

$\theta$  – крайовий кут, град;

$\sigma$  – поверхневий натяг, Н/м;

### Індекси:

A – адгезія;

K – когезія;

г – газ;

р – рідина;

руш – рушійна сила;

т – тверде тіло;

$d$  – динамічне значення твердих і рідких фаз на межі з газом (або іншою рідиною, що не принципово);

$\sigma_{\text{тр}}$  – міжфазний натяг;

$\theta$  – крайовий кут змочування;

$W_A$  і  $W_K$  – робота адгезії і когезії рідини.

Для моделювання і управління технологічними процесами, пов'язаними з особливостями властивостей реологічних харчових органічних і неорганічних продуктів, а так само при з'єднанні матеріалів і синтезі композитів, необхідний аналіз фізико-хімічних закономірностей взаємодії твердих і рідких фаз. Зокрема, необхідне визначення рушійних сил змочування, капілярної течії і розтікання рідини по поверхні твердих і рідких фаз. [1] Поверхневі явища відіграють також визначальну роль в процесах екстракції і капілярного просочування твердих

тіл розчинами. Велике значення має аналіз поняття адгезії [3] і закономірності зміни динамічних значень поверхневих натягів на всіх трьох межах.

Проаналізовані основні рівняння молекулярної теорії капілярності і умови їх використання при незворотних процесах змочування [5]. Наведені визначення явищ: змочування, розтікання і адгезії з позицій сучасних представлень фізичної хімії.

Розглянуті умови використання рівнянь Юнга, Дюпре, Лапласа і Кельвіна при незворот-

них процесах взаємодії твердих і рідких фаз, що конденсуються. Юнгом отримані рівняння [4]:

$$\cos\theta = 2W_A/W_K - 1;$$

$$\text{при } W_K = 2\sigma_{\text{пр}} \text{ маємо } W_A = \sigma_{\text{пр}}(1 + \cos\theta) \quad (1)$$

$$\text{і } \cos\theta = (\sigma_{\text{тр}} - \sigma_{\text{тр}})/\sigma_{\text{пр}}; \text{ або } K = \cos\theta, \quad (2)$$

де  $K$  – коефіцієнт змочування, що характеризує інтенсивність змочування за рівноважних умов;  $\sigma_{\text{тр}}$  і  $\sigma_{\text{пр}}$  – поверхневі натяги.

З (1) і (2) також слідує вираз для визначення  $F_{\text{руш}}$  – рушійної сили розтікання:

$$F_{\text{руш}} = \sigma_{\text{тр}} - \sigma_{\text{тр}} = \sigma_{\text{пр}} \cos\theta. \quad (3)$$

Відповідно до формалізму рівняння (2) коефіцієнт змочування  $K = \cos\theta$  можна використовувати тільки у випадку, якщо  $-1 \leq K \leq 1$  при  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ .

Дюпре вивів рівняння для роботи зворотного відділення рідини від поверхні твердого тіла  $W_A$  – роботи адгезії

$$W_A = \sigma_{\text{тр}} + \sigma_{\text{пр}} - \sigma_{\text{тр}} = \sigma_{\text{пр}}(1 + \cos\theta). \quad (4)$$

Рівняння (4) визначає зміну вільної енергії системи при переході із стану контакту тверда фаза – рідина до стану тверда фаза – газ і рідка фаза – газ в результаті зворотного ізотермічного процесу розділення. Цей тип контакту називається зворотною адгезією, при якій поверхні можуть бути розділені на фази, залишаючись при цьому незмінними. Рівняння Юнга, Дюпре і Лапласа виведені в умовах зворотного ізотермічного процесу і визначаються дією міжмолекулярних сил, тобто коли  $W_K > W_A$ . При незворотних процесах (змочування, розтікання)  $W_A < W_K$ . З аналізу рівняння (1) виходить, що  $W_A$  не може бути більше одиниці. На цю суперечність, в літературі, як нам відомо, практично не звертають увагу. Формули Юнга (1) і (2) отримані як проекція на ось  $Ox$  загального сумарного вектора поверхневих натягів  $\sigma_{ij}$  в рівноважних умовах і не відображають вертикальну складову цього вектора.

Наявність вертикальної складової твердого тіла (пружна і пластична деформація) викликає викривлення контактних поверхонь тонких підкладок. З розгляду векторів сил виходить, що три поверхневі натяги ні при якій формі краплі не можуть мати рівновагу, оскільки  $\sigma_{\text{тр}}$  і  $\sigma_{\text{тр}}$  лежать в одній площині і направлені одна проти іншої, а третя  $\sigma_{\text{пр}}$  розташована під кутом.

Тому є сила, що не компенсується, прикладена до контуру краплі і спрямована вертикально вгору [2]. Опукла поверхня краплі створює капілярний тиск Лапласа, який притискує її до плоскої поверхні. Для того, щоб капілярний тиск був урівноважений по всій поверхні, що обмежує краплю, необхідне формування лунки під нею так, щоб всі три сили уздовж контуру компенсувалися.

### Висновки:

1. Рівняння Юнга не враховує вертикальну складову вектора  $\sigma_{\text{пр}}$  і коректність його використання для нерівноважних систем і вимагає спеціального аналізу. В умовах рівноваги це рівняння не може бути використане при незворотних процесах змочування і розтікання, оскільки  $\cos\theta$  не може бути більше одиниці.

2. Для систем, далеких від рівноваги ( $\Delta\mu \neq 0$ ), використання рівнянь Юнга і Дюпре коректне і  $W_K$  збільшується і може застосовуватися тільки для аналізу динамічних значень  $\sigma_{\text{пр}}^d$ ,  $W_A^d$  і  $Q^d$ , на стадії швидкого розтікання.

3. Фізичний сенс поняття, у разі нерівноважного розтікання, відрізняється від поняття роботи адгезії, використовуваної в рамках молекулярної теорії капілярності. У нерівноважних системах характеризує енергію міжатомної взаємодії двох фаз, що конденсуються, в області межі між фазами.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Воюцкий С.С.* Аутогезия и адгезия высокополимеров. Ростов: Ростовиздат, 1960. – 244 с.
2. *Гупало А.П., Ватаманюк Н.М.* Высокомолекулярные соединения. М.: Издательство НКМВО, 1993. – 243 с.
3. *Кулінченко В.Р.* Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник. К.: Фірма ІНКОС, 2006. – 616 с.

4. *Остроумов С.А., Лазарева Е.В.* Поверхностное натяжение водных растворов додецисульфата в присутствии водных растений. Вода: технология и экология, 2008, № 3. – С 57-60.

5. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: Учебник. М.: 1988. – 340 с.

**INTERACTION OF SOLID AND LIQUID PHASES. DRIVING FORCES SPREADING, ADHESION, MOISTENING**

**Basok B.I.<sup>1</sup>, Kulichenko V.R.<sup>2</sup>, Kaptanovskiy D.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<sup>2</sup> National University of Food Technology, vul. Vladymyrskaya, 68, Kyiv, 01033, Ukraine

<sup>3</sup> Cherkasskiy State Technological University, Shevchenko, 460, Cherkassy, Ukraine

The authors analyzed the molecular theory basic equation of capillarity and conditions for their using in irreversible wetting processes. It was established that Young's equation, Dupre's equation, Laplace's equation and Kelvin's equation in mutual action irreversible processes of liquid phases, which are condensed and solid phases, can not be used because they (equations) are derived in a reversible process and subjected to the action of the molecular forces. Ref. 5.

**Key words:** capillarity, moistening, phase, irreversible process, isothermal process.

1. *Voyuckij S.S.* Autogeziya i adgeziya vysokopolimerov. Rostov: Rostovizdat, 1960. – 244 s. (Rus)

2. *Gupalo A.P., Vatamanyuk N.M.* Vysokomolekulyarnye soedineniya. M.: Izdatelstvo NMKVO, 1993. – 243 s. (Rus)

3. *Kulichenko V.R.* Gidravlika, gidravlichni mashini i gidroprivid: Pidruchnik. K.: Firma INKOS, 2006. – 616 s. (Ukr)

4. *Ostroumov S.A., Lazareva E.V.* Poverxnostnoe natyazhenie vodnyx rastvorov dodecisulfita v prisutstvii vodnyx rastenij. Voda: Tekhnologiya i ekologiya, 2008, № 3. – s. 57-60. (Rus)

5. *Frolov Yu.G.* Kurs kolloidnoj ximii. Poverxnostnye yavleniya i dispersnye sistemy: Uchebnik. M.: 1988. – 340 s. (Rus)

*Отримано 21.10.2014*

*Received 21.10.2014*

УДК 621.039.5:536.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УХУДШЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДЫ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

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

Кондратьева Е.А., к.т.н., Тыринов А.И., к.т.н.

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

Представлено результати чисельного моделювання теплообмінних процесів плинну води надкритичного тиску в вертикальній трубі, що обігривається. Досліджені умови виникнення режимів погіршеного теплообміну.

Представлены результаты численного моделирования теплообменных процессов при течении воды сверхкритического давления в вертикальной обогреваемой трубе. Исследованы условия возникновения режимов ухудшенного теплообмена.

The results of numeral simulations of heat transfer processes are presented for the flow of supercritical water in the vertical heated pipe. The conditions of the worsened heat transfer are investigated.

Библ.10, рис. 5.

**Ключевые слова:** численное моделирование, вертикальная труба, сверхкритическое давление.

$G_k$  – генерация турбулентной энергии;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $h$  – энтальпия;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $p$  – давление;  
 $q$  – плотность теплового потока;  
 $S$  – тензор скоростей деформации;  
 $s$  – постоянная, равная 0,97;  
 $T$  – температура;  
 $V$  – вектор скорости теплоносителя;  
 $w$  – скорость;  
 $y$  – поперечная координата;  
 $z$  – продольная координата;

$\delta_{nm}$  – тензор Кронекера второго ранга;  
 $\varepsilon$  – скорость диссипации;  
 $\vec{k}$  – орт;  
 $\mu$  – вязкость;  
 $\rho$  – плотность.

### Индексы:

$v_x$  – входной параметр;  
 $ж$  – жидкость;  
 $eff$  – эффективный;  
 $k$  – кинетический;  
 $t$  – турбулентный;  
 $\varepsilon$  – относится к скорости диссипации.

### Введение

Опыт эксплуатации энергоблоков ТЭС с водой сверхкритических параметров показал наличие проблем связанных с возникновением в теплообменных трубах режимов с ухудшенным теплообменом. Для обоснования надежной работы энергоблоков ТЭС было проведено большое количество теоретических и экспериментальных исследований теплообмена при течении воды сверхкритических параметров в трубах. Исследования показали наличие режимов с нормальным теплообменом, характеризующимся монотонным изменением температуры стенки по

длине обогреваемой трубы и с ухудшенным теплообменом, характеризующимся резко выраженным локальным повышением температуры стенки. Попытки описать достаточно точно теплоотдачу в режимах ухудшенного теплообмена не всегда приводят к желаемому результату.

Исследованию теплообмена при сверхкритическом давлении посвящено много работ [1-4]. Отмечается, что сложность описания процессов теплообмена при течении жидкости сверхкритического давления требует изучения структуры потока. В работе [5] проанализированы экспериментальные данные по теплообмену при

сверхкритическом давлении в трубах и пучках стержней. В результате сильного уменьшения плотности среды при приближении к критической температуре возникает термическое ускорение потока, что приводит к снижению турбулентности. При подъемном течении теплоносителя в вертикальной трубе профиль скорости приобретает М-образную форму с максимумом вблизи стенки. В этой области образуется запирающий для переноса теплоты слой, что приводит к ухудшению теплообмена и повышению температуры стенки. Нет единого мнения по определению граничного значения теплового потока, превышение которого приводит к возникновению режимов с ухудшенной теплоотдачей и его зависимости от режимных и геометрических параметров. На основании экспериментальных данных [6] можно сделать вывод о том, что при течении воды сверхкритических параметров в трубах нижняя граница возникновения зоны с ухудшенным теплообменом определяется условием  $q_c/\rho w \geq 0,6$  кДж/кг. Особенно большой разброс данных по определению границы ухудшенного теплообмена возникает при малых массовых скоростях теплоносителя.

Для определения границ области ухудшенного теплообмена в каналах используют теоретические методы решения задачи конвективного теплообмена при течении жидкости с переменными теплофизическими свойствами. Актуальным остается вопрос повышения точности расчета течения и теплообмена в околокритической области параметров теплоносителя в связи с переходом на новый стандарт свойств воды IF-97. В работе представлены результаты численного моделирования подъемного течения воды в вертикальной обогреваемой трубе диаметром 16 мм, длиной 4 м при давлении 24,5 МПа, массовой скорости 250 кг/(м<sup>2</sup>с) для температуры на входе  $T_{вх} = 200, 230, 250$  °С. На стенке трубы задавался постоянный тепловой поток.

Численное моделирование течения воды в трубе выполнено на основе RNG  $k-\epsilon$  модели турбулентности, включающей систему уравнений сохранения массы, количества движения, энергии теплоносителя, а также уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии [7]. Теплофизические свой-

ства воды сверхкритических параметров описывались согласно формуляции IF-97 [8]. Расчеты проводились методом контрольного объема [9].

Основные уравнения математической модели:

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial \nabla(\mu_t / \rho)}{\partial t}}_I + (V \cdot \nabla)V \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \nabla V \delta_{nm} \right) \right] + F \vec{k}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sqrt{2S}} \nabla h \right)}_I + \nabla(\rho h V) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{Pr_{\text{eff}}} \nabla h \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sqrt{2S}} \nabla k \right)}_I + \nabla(\rho k V) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{Pr_k} \nabla k \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + s \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sqrt{2S}} \nabla \epsilon \right)}_I + \nabla(\rho \epsilon V) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{Pr_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + S_\epsilon, \quad (4)$$

$$G_k = \mu \left( \nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \nabla V \delta_{nm} \right)^2, \quad (5)$$

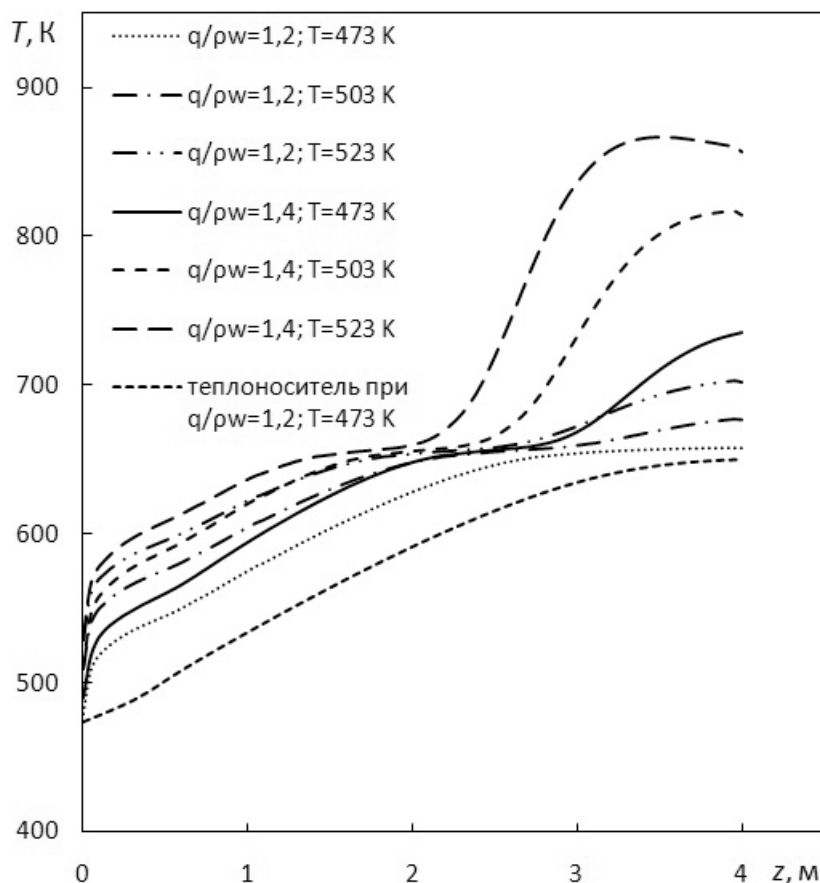
$$S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad S_\epsilon = \rho \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \epsilon), \quad C_1 = 1,42,$$

$$C_2 = 1,68,$$

где  $F = \rho g$  – подъемная сила,  $\nabla$  – тензорная дивергенция,  $\nabla V$  – тензорный градиент, который преобразует вектор (тензор первого ранга) в тензор второго ранга,  $(\nabla V)^T$  – сопряженный тензорный градиент,  $I$  – дополнительное слагаемое, учитывающее нестационарность турбулентных процессов.

**Результаты расчета.** На рис. 1, 2 показано распределение температуры стенки по длине трубы при изменении температуры воды на входе и тепловой нагрузки.

Режим ухудшенного теплообмена возникает при значении параметра  $q/\rho w = 1,2$  кДж/кг и тем-



**Рис. 1.** Распределение температуры стенки по длине трубы при  $q/\rho w = 1,2$  и  $1,4$  кДж/кг.

температуре воды на входе  $T_{\text{вх}} = 250$  °С. При меньших значениях температуры на входе наблюдается режим нормального теплообмена с монотонным изменением температуры стенки. Зона ухудшенного теплообмена наблюдается на выходе из трубы. С ростом тепловой нагрузки режим ухудшенного теплообмена возникает при меньшей температуре воды на входе. С ростом входной температуры зона ухудшенного теплообмена сдвигается к входу. Для режимов, представленных на рис. 1 с ростом температуры воды на входе максимальное значение температуры стенки растет. В режимах с большей тепловой нагрузкой  $q/\rho w = 1,6$  кДж/кг с увеличением температуры теплоносителя на входе зона ухудшенного теплообмена тоже сдвигается к входу, однако максимальное значение температуры стенки меняется слабо (рис. 2).

Резкое увеличение температуры стенки наблюдается в области перехода температуры теплоносителя к сверхкритическому значению. В

этой области наблюдается резкое ускорение потока и деформация профиля скорости. На рис. 3 представлены профили скорости в разных сечениях по длине трубы в режиме  $q/\rho w = 1,4$  кДж/кг,  $T_{\text{вх}} = 250$  °С.

В сечении  $z = 3,4$  м, где температура стенки достигает максимального значения (рис. 1), профиль скорости имеет М-образную форму с максимумом вблизи стенки, что согласуется с результатами исследований, представленных в работе [10]. В этой работе представлены результаты расчета теплообмена и гидродинамики при течи воды в вертикальной обогреваемой трубе в диапазоне давлений 22,5...29,5 МПа, энтальпии потока 500...3500 кДж/кг, массовой скорости 250...3000 кг/(м<sup>2</sup>с) и тепловой нагрузки, соответствующей параметру  $q/\rho w = 0,2...1,2$  кДж/кг. Авторы отмечают, что представленный интегральный метод расчета конвективного теплообмена при течи воды сверхкритического давления позволяет получить достоверные расчет-

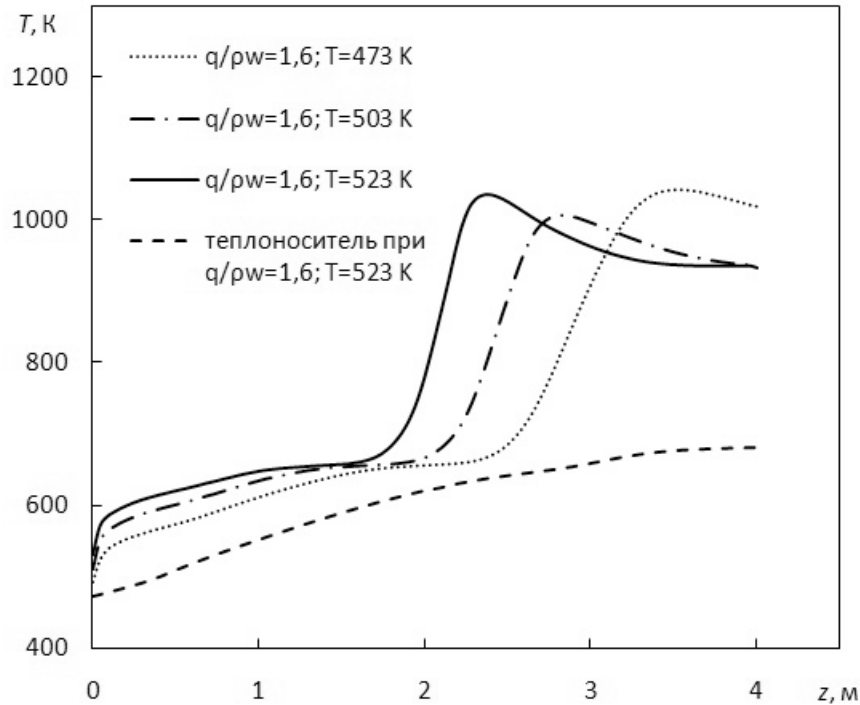


Рис. 2. Распределение температуры стенки по длине трубы при  $q/\rho w = 1,6$  кДж/кг.

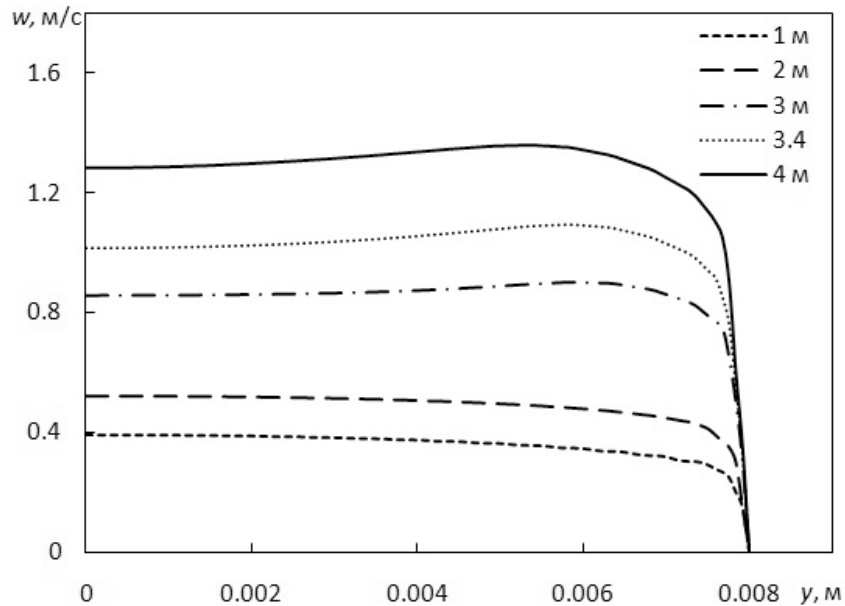
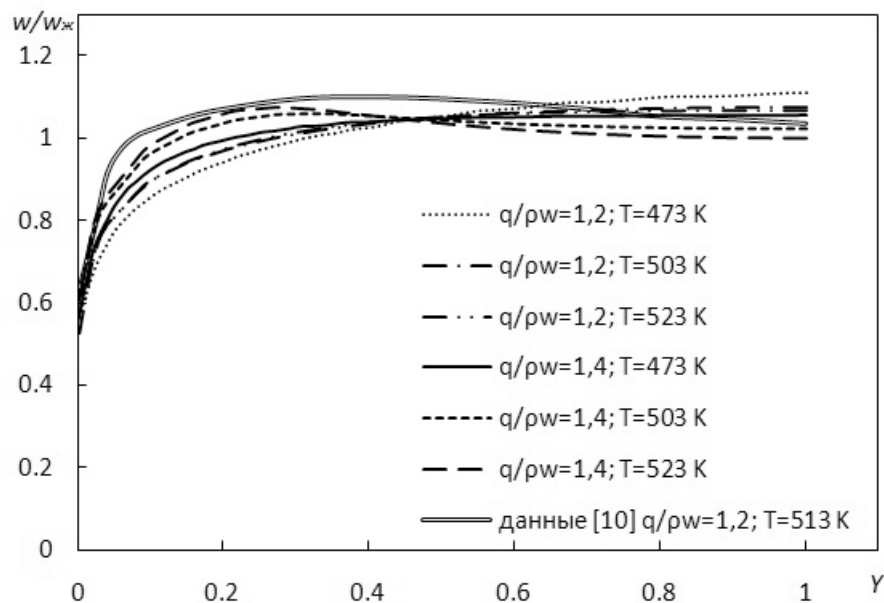


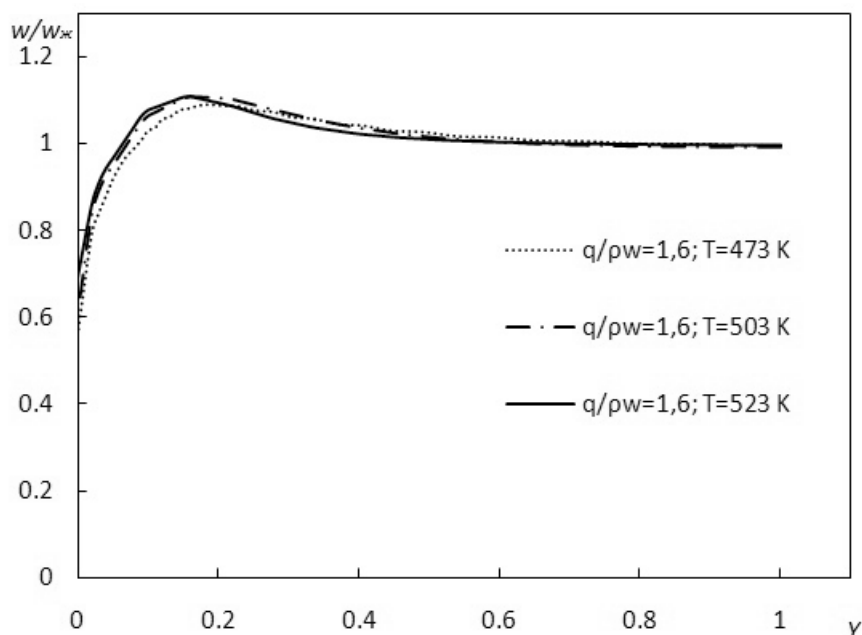
Рис. 3. Распределение скорости теплоносителя в сечениях по длине трубы в режиме  $q/\rho w = 1,4$  кДж/кг,  $T_{вх} = 250$  °С.

ные данные только при «умеренных» тепловых нагрузках, соответствующих области нормального теплообмена. Процесс ухудшения теплоотдачи, вызванный перестройкой структуры потока, интегральная методика не описывает. Од-

нако результаты расчета, полученные при «больших» тепловых нагрузках, представляют интерес с точки зрения моделирования условий теплообмена при течении с М-образным профилем скорости. На рис. 4 представлено сравнение распре-



**Рис. 4. Распределение относительной скорости теплоносителя в сечениях с максимальным значением температуры стенки.**



**Рис. 5. Распределение относительной скорости теплоносителя в сечениях с максимальным значением температуры стенки.**

деления по сечению трубы относительной скорости  $w/w_{ж}$  в сечениях с максимальным значением температуры стенки и результатов, полученных в работе [10] при значении параметра  $q/\rho w = 1,2 \text{ кДж/кг}$ . Средняя скорость жидкости  $w_{ж}$  определялась путем интегрирования профиля

скорости по сечению трубы. Наблюдается качественное согласование результатов, однако, для режимов с большей тепловой нагрузкой ( $q/\rho w = 1,4 \text{ кДж/кг}$ ).

На рис. 5 представлено распределение по сечению относительной скорости  $w/w_{ж}$  в се-

чениях с максимальным значением температуры стенки при значении параметра  $q/rw = 1,6$  кДж/кг для разных значений температуры воды на входе.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением тепловой нагрузки профиль относительной скорости деформируется сильнее, максимальное значение скорости сдвигается к стенке. В режимах, представленных на рис. 4, наблюдается существенная деформация профиля относительной скорости с изменением температуры воды на входе. Профиль приобретает более выраженную М-образную форму, что согласуется с ростом максимального значения температуры стенки в области ухудшенного теплообмена при увеличении температуры воды на входе (рис. 1). В режимах, представленных на рис. 5, профиль относительной скорости меняется незначительно с увеличением температуры воды на входе, соответственно и максимальное значение температуры стенки в зоне ухудшенного теплообмена меняется слабо (рис. 2).

### Выводы

1. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена при течении воды сверхкритического давления в вертикальной обогреваемой трубе показало, что режимы ухудшенного теплообмена возникают при значении параметра  $q/rw \geq 1,2$  кДж/кг.

2. С увеличением температуры воды на входе локальная зона ухудшенного теплообмена сдвигается к входу, максимальное значение температуры стенки увеличивается.

3. С увеличением плотности теплового потока профиль скорости существенно деформируется, приобретает М-образную форму с максимумом вблизи стенки. Возникновение режимов ухудшенного теплообмена связано с изменением структуры потока, существенной деформацией профиля скорости, вызванной термическим ускорением потока вблизи стенки, что существенно снижает отвод теплоты от стенки в ядро потока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Курганов В.А. Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: некоторые итоги научного исследования // Труды РНКТ-4. – 2006. – Т.1. – С.74 – 83.

2. Pioro I.L., Khartabil H.F., Duffey R.B. Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels-empirical correlations (survey) // Nucl. Eng. Design. – 2004. – v.230. – P. 69 – 91.

3. Cheng X, Schulenberg T. Heat transfer at supercritical pressure – literature review and application to a HPLWR // Wissenschaftliche Berichte FZKA6609 / Forschungszentrum, Karlsruhe, May, 2001.

4. Pioro I., Khartabil H., Duffey R. Heat transfer at supercritical pressures (survey) // Proc. 11-th Intern. Conf. on Nucl. Eng. Tokyo, Japan, April 20 – 23. – 2003. Paper ICONE 11–36454.

5. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. Теплообмен при сверхкритических давлениях и границы ухудшенного теплообмена // Теплоэнергетика. – 2006. – №4. – С.46 – 51.

6. Кириллов П.Л., Ложкин В.В., Смирнов А.М. Исследование границ ухудшенных режимов в каналах при сверхкритических давлениях // Препринт ФЭИ–2988. – 2003.

7. Авраменко А.А., Басок Б.И., Дмитренко Н.П., Ковецкая М.М., Тыринов А.И., Давыденко Б.В. Ренормализационно групповой анализ турбулентности. Киев. ТОВ «ЭКСПРЕС». – 2013. – 300 с.

8. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. М.: Изд. Дом МЭИ. – 2009.

9. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир. – 1980. – 616 с.

10. Курганов В.А., Маслакова И.В. Интегральный метод расчета стабилизированной теплоотдачи в трубах в однофазной околоскритической области // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, № 4. – С. 568 – 581.

**RESEARCH OF MODES OF THE  
WORSENERD HEAT TRANSFER FOR  
THE FLOW OF SUPERCRITICAL  
PARAMETERS IN THE VERTICAL PIPE**

**A.A. Avramenko, M.M. Kovetskaya,  
E.A. Kondratieva, A.I. Tyrinov**

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

This paper analyzes the processes of heat transfer for the flow of supercritical water in the vertical heated pipe. Numerical study of the processes was based on the  $k$ - $\epsilon$  RNG turbulence model. The results of simulations allow analyzing character of thermophysical and hydrodynamic processes. The conditions of occurred of worsened heat and the effects of influence of the inlet temperature and the parameter  $q/\rho w$  are investigated.

References 10, fig. 5.

**Key words:** numerical modeling, vertical pipe, supercritical pressure.

1. *Kurganov V.* Heat transfer in tubes at supercritical pressures of media: some results of science studies // Works of Russian national conference of heat exchange – 4. – 2006. – v.1. – P. 74 – 83. (Rus.)

2. *Pioro I.L., Khartabil H.F., Duffey R.B.* Heat transfer to supercritical fluids flowing in channels-empirical correlations (survey) // Nucl. Eng. Design. – 2004. – v. 230. – P. 69 – 91.

3. *Cheng X, Schulenberg T.* Heat transfer at supercritical pressure – literature review and application to a HPLWR // Wissenschaftliche Berichte FZKA6609 / Forschungszentrum, Karlsruhe, May, 2001.

4. *Pioro I., Khartabil H., Duffey R.* Heat transfer at supercritical pressures (survey)// Proc. 11-th Intern. Conf. on Nucl. Eng. Tokyo, Japan, April 20 – 23. – 2003. Paper ICONE 11–36454.

5. *Grabeshnaia V., Kirillov P.* Heat transfer at supercritical pressures and boundaries of worsened heat // Teploenergetika. – 2006. – №4. – P. 46 – 51. (Rus.)

6. *Kirillov P, Lozhkin V., Smirnov A.* The study boundaries degraded of worsened heat in channels with supercritical pressure // Report of IPPE–2988. – 2003. (Rus.)

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

8. *Alexandrov A., Orlov K., Ochkov V.* Thermophysical properties of the working materials engineering.– M.: Pub. H. MPEI. – 2009. (Rus.)

9. *Roach P.* Computational fluid dynamics. – M.: Mir. – 1980. – 616 p. (Rus.)

10. *Kurganov V., Maslakova I.* Integral method for calculating heat transfer in pipes stabilized at about monophasic near critical region // Thermophysic High temperatures. – 2010. – v. 48, № 4. – P. 568 – 581. (Rus.)

*Получено 23.10.2014*

*Received 23.10.2014*

УДК 532.546:536.24:004.942

## CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ПАРОВО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Круковский П.Г., докт. техн. наук, Полубинский А.С., канд. физ-мат. наук,

Тадля О.Ю., канд. техн. наук, Коваленко В.Н., канд. техн. наук

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

Розглянуто CFD-модель, що враховує процеси переносу пари та вологи, що надходять в пористі будівельні матеріали з вологого повітря. На відміну від існуючих, розглянута модель, яка враховує спряжений паро- та вологоперенос, а також співвідношення між паровою та вологістною складовими відповідно до кривої сорбції, наявної для розглянутого будівельного матеріалу. Проведено аналіз особливостей реалізації розробленої моделі в середовищі програми ANSYS-FLUENT, а також порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними при зволоженні газобетону.

Рассмотрена CFD-модель, учитывающая процессы сопряжённого переноса пара и влаги, поступающие в пористые строительные материалы из влажного воздуха. В отличие от существующих, рассмотренная модель учитывает сопряженный паро- и влагоперенос, а также соотношение между паровой и влажностной составляющими в соответствии с кривой сорбции, имеющейся для рассматриваемого строительного материала. Проведен анализ особенностей реализации разработанной модели в среде программы ANSYS-FLUENT и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными при увлажнении газобетона.

Presented CFD-model considers coupled vapor and moisture transfer processes in porous building materials. In contrast to the existing models, it takes into account the ratio between vapor and moisture components in accordance with the building materials' sorption curve. The specific analysis of the model development in ANSYS-FLUENT is presented and the results are compared with experimental data of the gas concrete humidification.

Библ. 12, табл. 1, рис. 5.

**Ключевые слова:** пористые строительные материалы, паро- и влагоперенос, кривая сорбции, CFD-моделирование.

$a$  – соотношение между влагосодержанием и абсолютной влажностью согласно кривой сорбции для данного материала;

$B$  – барометрическое давление, 101325 Па;

$D$  – коэффициент диффузии пара в воздухе, м<sup>2</sup>/с;

$D_w$  – влагопроницаемость (агрегатное состояние – вода) в материале, кг/(м·с·%);

$d$  – содержание влаги в каждой ячейке, кг/кг;

$H$  – энтальпия, кДж/кг;

$h_v$  – теплота парообразования, 2,5·10<sup>6</sup> Дж/кг;

$k$  – степень интенсивности поглощения (либо выделения) влаги из пара паровоздушной смеси;

$m$  – концентрация (доля паров воды во влажном воздухе), кг/кг;

$P$  – парциальное давление, Па;

$P_{нас}$  – давление насыщения, Па;

$w$  – влагосодержание в материале, кг/кг;

$x$  – координата, м;

$\beta$  – коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>2</sup>·с·Па);

$\delta$  – паропроницаемость (агрегатное состояние – пар) материала, кг/(м·с·Па);

$\lambda_w$  – теплопроводность влажного материала, Вт/(м·С);

$\tau$  – время, с.

### Нижние индексы:

$v$  – параметр относится к пару;

$w$  – параметр относится к влаге;

$D_{гв}$  – свойство, относящееся к сухому материалу;

$нар$  – параметр относится к области снаружи газобетона;

$пов$  – параметр относится к границе.

В течение последних десятилетий проектируются и строятся здания высокой энергоэф-

фективности. Эти здания должны проектироваться без ущерба для комфорта, находящихся

ся в них людей. Два ключевых параметра: температура и относительная влажность воздуха, играют важную роль в определении условий в помещениях и зданиях. В то время как влияние температуры хорошо известно и изучено, влияние влажности не всегда принимается во внимание. Необходимо учитывать изменение влажностного режима, как в самом помещении, так и внутри ограждения для того, чтобы не допускать конденсации влаги на внутренней поверхности наружных ограждений и/или внутри их, поскольку повышенная или пониженная влажность в помещении может сделать некомфортной жизнь жителей, а также вызывать серьезные проблемы со здоровьем у жителей из-за наличия плесени и грибка.

Теплозащитные свойства ограждающих конструкций существенно зависят от влажностного состояния материалов, повышение которой приводит к снижению их теплозащитных качеств (за счет увеличения теплопроводности ограждающих конструкций), увеличению теплотерь и снижает их долговечность.

Анализ и прогнозирование влажности ограждающих конструкций можно осуществлять с помощью моделирования сопряженного паро- и влагопереноса между помещением и этими конструкциями. Для этого модели должны учитывать раздельно составляющие в виде пара (в помещении и ограждающей конструкции) и влаги (в ограждающей конструкции).

Существуют различные методы моделирования влажностных задач. Упрощенные инженерные методики используются для оценочных расчетов количества влаги, которое может накопиться в ограждающей конструкции, мест возможного возникновения конденсата на поверхности или внутри конструкции (т.н. «точки росы») [1-3]. Они имеют следующие основные недостатки – использование стационарного теплового режима, как помещения, так и окружающей среды, а также постоянных значений коэффициентов материалов (паропроницаемости, влагопроницаемости и т.п.). Эти упрощения не позволяют получать реальную картину текущего тепловлажностного состояния в ограждающей конструкции.

С появлением производительной компью-

терной техники, разработанные инженерные зависимости стали широко применяться в программах различного уровня сложности, краткое сравнение возможностей которых приведено в [4]. Обычно эти программы рассчитывают средние температуры и относительные влажности в помещении и большинство из них не учитывают перенос массы пара на границе между воздухом и ограждающей конструкцией здания.

Поскольку использование средней температуры воздуха для различных потребностей расчетов теплового состояния помещения было недостаточно, стали развиваться методы CFD-моделирования. Эти модели наиболее полно описывают процессы тепло- и влагообмена, происходящие в помещении и стенах. Однако на текущий момент есть технические сложности в реализации полного сопряженного тепло- и влагообмена для помещения [5]. Проблема в данном случае связана еще и с тем, что для полного сопряженного теплообмена с учетом радиационной составляющей ограждающие конструкции помещения должны представлять собой твердые стены (в программе ANSYS-FLUENT необходимо задавать опцию «wall»). Однако, в таком случае невозможно передавать поток массы через стены (перенос пара, влаги, воздуха в окружающую среду или из нее). Для того, чтобы решить эту проблему пользователи CFD-программ вынуждены писать специальные подпрограммы, которые носят название «user define function» или же «user define scalar».

Поскольку решение полностью сопряженной нестационарной задачи тепломассобмена в помещении с ограждениями было сложной задачей, некоторые исследователи пошли по пути соединения CFD-модели помещения и упрощенной влажностной модели в сосредоточенных параметрах ограждения [6]. Однако, такой подход не позволяет решать задачу движения и накопления влаги в конструкции. Как один из вариантов решения проблемы, существует подход по представлению стены как неподвижной жидкости с соответствующими свойствами материалов. Этот подход использован в [7]. В этой модели решалась стационарная задача и не учитывался радиационный теплообмен

между поверхностями ограждений помещения, и не было сравнения с данными натурального эксперимента.

В процессе паро- и влагопереноса через ограждения участвуют три вида веществ: воздух, пар и жидкость. При этом в ограждающей конструкции происходит диффузия водяного пара в движущейся паровоздушной смеси через поры материала ограждения, – фильтрация влажного воздуха из-за разницы влажностей окружающей среды и внутреннего воздуха, а также возникновение и перемещение влаги в виде адсорбируемой жидкости, приводящей к изменению влагосодержания материала ограждения. Эти процессы не действуют раздельно, а оказывают друг на друга взаимное влияние. Увеличение влагосодержания материала ограждения ведет за собой уменьшение относительной влажности паровоздушной смеси, которая отдает часть влаги материалу ограждения. Увеличение влажности материала ограждения называется сорбцией, снижение влажности материала называется десорбцией материала. Зависимость между количеством влаги в материале и влажностью воздуха, находящегося в виде паровоздушной смеси в материале, называют изотермой сорбции. Изотермы определяются экспериментальным путем для каждого материала при комнатной температуре.

Для прогнозирования изменения влажностного состояния ограждающих конструкций в помещении необходимы кривые сорбции материалов конструкции и эмпирические коэффициенты их паро- и влагопроницаемости. Однако, приведенные в литературе для каждого материала параметры, не могут широко использоваться, поскольку определяются экспериментальным путем для конкретных условий и ограниченных значений различных параметров (температура, влагосодержание, пористость материала и относительная влажность). Это же касается коэффициента массоотдачи между влажным воздухом и конструкций  $\beta$ , численное значение которого определяется в зависимости от коэффициента конвективной теплоотдачи, значения не всегда точно известного. Также возникает необходимость в проведении долговре-

менных расчетов, которые позволяют расчетным путем определить время и степень насыщения влагой материалов конструкции.

Проведенный литературный поиск [4] показал отсутствие среди существующих моделей, учитывающих отдельно паровую и влажностную составляющие. Также нет данных о проверке получаемых результатов на удовлетворение соотношения пара в воздухе и влаги в исследуемом материале в стационарном режиме. Поэтому разработка модели, учитывающей сопряженный паро- и влагоперенос между воздушной средой и строительной конструкцией помещения с учетом пара и влаги отдельно является актуальной задачей, решаемой ниже авторами.

Ставится задача разработать модель, которая будет удовлетворять следующим требованиям:

1. модель тепловлагопереноса должна удовлетворять соотношению влаги в материале ограждающих конструкций и пара согласно кривой сорбции для этого материала при долговременном расчете;
2. модель должна описывать нестационарное распределение пара и влаги (отдельно) в объеме строительного материала;
3. модель должна учитывать переход пара из объема помещения в ограждающую конструкцию и его переход во влагу и наоборот в самой ограждающей конструкции;
4. модель должна быть сопоставлена с имеющимися экспериментальными данными.
5. модель должна выполнять расчеты теплопаро- и влагопереноса в материале в широко используемых компьютерных CFD-программах, например, ANSYS-FLUENT.

Будем различать стационарный равновесный процесс переноса пара и влаги и нестационарный неравновесный процесс в материале. Первый определяется кривой сорбции, в то время как во втором соотношении пара и влаги может быть не равным соотношению по кривой сорбции.

**Коэффициент паропроницаемости** представляет собой количественную величину потока пара, проходящего через материал толщиной 1 м за единицу времени при единичной разнице парциальных давлений.

**Коэффициент влагопроницаемости** характеризует количество влаги за единицу времени через единицу длины при определенных условиях влажности на поверхностях.

Два вышеприведенных коэффициента определяются в стационарных тепловых и влажностных условиях на образцах материалах и на наш взгляд не могут служить характеристиками нестационарного процесса увлажнения или осушения материала. Введем коэффициент  $k$ , который характеризует интенсивность поглощения (выделения) влаги из (в) паровоздушную смесь в нестационарных условиях.

**Целью работы** является разработать и верифицировать CFD-модель, учитывающую процессы сопряженного переноса пара и влаги в пористых строительных материалах, и отвечающую всем вышеперечисленным требованиям.

Рассмотрим процессы переноса влаги и пара в пористых строительных материалах на примере увлажнения образца газобетона размером  $50 \times 50 \times 100$  мм [10]. Созданная модель тестировалась (согласно требованиям п.5.) по результатам экспериментальных исследований влагосодержания по высоте блока газобетона, приведенным в [10]. В экспериментальной установке предварительно высушенные образцы помещались в изолированные камеры, где снизу поддерживались постоянные температурные и влажностные условия ( $70^\circ\text{C}$  и  $100\%$ ), а сверху –  $70^\circ\text{C}$  и  $0\%$ . Замеры влажности в блоке проводились в различные моменты времени в шести местах по высоте блока.

Физическая модель процессов, происходящих в исследуемом образце следующая. Молекулы пара и влаги из воздуха нижней камеры абсорбируются нижней поверхностью сухого блока (поверхностная сорбция). По условиям эксперимента в нижней камере постоянно присутствуют пар и влага, которые являются источником при увлажнении газобетона. Далее по высоте блока пар и влага в паровоздушной смеси перемещаются вверх по порам и капиллярам. Движения самой паровоздушной смеси в образце не учитывается. По пути паровоздушная смесь осушается (уменьшается количество пара) за счет того, что она отдает материалу блока часть в виде влаги. Некоторая часть вла-

ги также конденсируется на поверхности пор, превращаясь в капли воды. При наличии определенных условий сконденсированная влага и влага в материале может возвращаться обратно из материала в паровоздушную смесь. Максимальное содержание влаги в материале газобетона ограничивается значением его сорбционной влажности. Дальнейшее накопление влаги в области, где достигнуто максимальное влагосодержание, не происходит. В этом случае, увеличивается влагосодержание рядом расположенных областей.

Поскольку в пористых материалах ограждений влага может перемещаться в парообразной и/или жидкой фазе из-за различных движущих сил, то большинство ученых принимает два или более потенциалов для переноса влаги (парциальное давление и влагосодержание). Рассмотрим ряд моделей.

Модель 1. Математическая модель процессов тепло-, паро- и влагопереноса согласно [8] в ограждающей конструкции описывается двумя уравнениями.

- Уравнением паро- и влагопереноса в материале ограждающей конструкции

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_w \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где первое слагаемое в правой части отвечает за транспорт воды в материале, второе – за транспорт пара в материале, а левая часть это количество влаги, которая накапливается в материале.

- Уравнением энергии для всей области решения

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right] + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left[ \delta \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (2)$$

где первое слагаемое в правой части отвечает за передачу теплоты во влажном материале, второе – за влияние теплоты парообразования/конденсации на тепловой режим ограждения.

В явном виде соотношение между паром и влагой согласно кривой сорбции в данной модели не учитывается. Это не позволяет остановить процесс накопления влаги материалом, т.к. отсутствует величина максимального влагосодержания известная из изотермы сорбции. Поскольку

в модели нет отдельно паровой и влажностной составляющей, решение сопряженной задачи с воздухом невозможно.

Также стоит обратить внимание на то, что входящие в уравнение коэффициенты  $D_w$  и  $\delta$  находятся экспериментально в стационарных равновесных условиях и для условий нестационарных расчетов, строго говоря, применяться не могут. Следовательно, их необходимо идентифицировать по результатам имеющихся экспериментов.

Добавим к системе из двух предыдущих уравнений третье, отвечающее за диффузию пара в паровоздушной смеси (воздухе). Это позволит решать задачу тепло- и влагопереноса как в самом ограждении, так и в паровоздушной среде внутреннего объема помещения.

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial m}{\partial x} \right]. \quad (3)$$

Парциальное давление в формуле (1) определяется

$$P = \frac{d \cdot B}{0,622 + d}, \quad (4)$$

где  $d = m/(1 - m)$  – концентрация влаги в рассматриваемом объеме.

Под коэффициентом  $D$  поднимается коэффициент диффузии пара в паровоздушной среде в порах газобетона и численно он не равен коэффициенту диффузии пара в воздухе. Система уравнений (1) – (2) широко распространена и используется [6, 8, 9] для определения общего количества пара и влаги в материале без различия этих двух компонентов.

Рассматривая влагу, как часть паровоздушной смеси, которая проникает внутрь пористого строительного материала, авторы подразумевают под относительной влажностью содержание пара и влаги в смеси, а под влагосодержанием – количество только влаги в материале.

Модель 2. Авторами предлагается моделирование перехода части пара во влагу через некий коэффициент  $k$ , который говорит о том, что при  $m > w$  из свободной паровоздушной смеси часть влаги поглощается пористым материалом, и наоборот, при  $w > m$  влага возвращается в смесь

из материала. Назовем  $k$  коэффициентом интенсивности поглощения (выделения) влаги из (в) паровоздушной смеси. В модели должен соблюдаться баланс между коэффициентом  $k$  и  $D_w$ . Если коэффициент  $k$  имеет небольшое значение, это означает, что в модели имеется небольшое количество влаги, за транспорт которого отвечает  $D_w$ . Т.о., мы заменяем слагаемое со второй производной по парциальному давлению в уравнении (1) слагаемым с коэффициентом  $k$ , численно определяющим количество влаги из смеси переходящее в пористый материал.

Тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_w \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (5)$$

где  $k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$  – слагаемое, отвечающее за количество пара, переходящее во влагу или наоборот (условно назовем его источник), в котором:

$k \cdot (a \cdot m - (w + m))$  – степень поглощения/накопления влаги, а  $\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$  – сомножитель, отвечающий за транспорт пара.

Коэффициент  $a = (w + m)/m$  в (5) отвечает за соотношение влаги и пара в материале согласно кривой сорбции, как в стационарном, так и нестационарном режимах. Когда  $w + m = a \cdot m$ , тогда поглощения/накопления влаги нет. При этом транспорт пара есть, если  $\partial^2 P / \partial x^2 \neq 0$ . Накопление может быть в соседних ячейках, где  $w + m \neq a \cdot m$ . Интенсивность транспорта пара, определяемого величиной  $\partial^2 P / \partial x^2$  и интенсивность насыщения пара  $k \cdot (a \cdot m - (w + m))$  могут независимо приводить к обнулению источника. Максимальное значение  $w + m$  в любой точке в стационарном режиме (для бесконечного момента времени) должно соответствовать кривой сорбции при своем значении  $m$ . Если  $m > w$ , то тогда второе слагаемое будет иметь отрицательное значение и будет происходить возврат влаги в пар.

Тогда в уравнении (3) необходимо отнять некоторое количество влаги, которое образуется из пара паровоздушной смеси.

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial m}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial x} \right], \quad (6)$$

где первое слагаемое в правой части отвечает за диффузию пара в паровоздушной смеси, второе – за количество влаги, которая удаляется из паровоздушной смеси. В обеих моделях учитывается зависимость коэффициента теплопроводности влажного материала от влагосодержания

$$\lambda(w) = \lambda_{\text{Dry}} + \lambda_w \cdot w. \quad (7)$$

Изотермы сорбции материалов определяют обычно при комнатной температуре весовым методом согласно [11] по нескольким экспериментальным измерениям (для газобетона см. рис. 1, а). Полученное в эксперименте путем взвешивания массовое влагосодержание по изотерме сорбции является суммой количества влаги и пара, которые находятся в образце, в то время как в разработанной модели эти две составляющие разделены. Поскольку в литературе не нашлось данных о том, как ведет себя кривая сорбции для газобетона при температуре 70 °С, авторы статьи попытались самостоятельно оценить, как изменится кривая сорбции с повышением температуры.

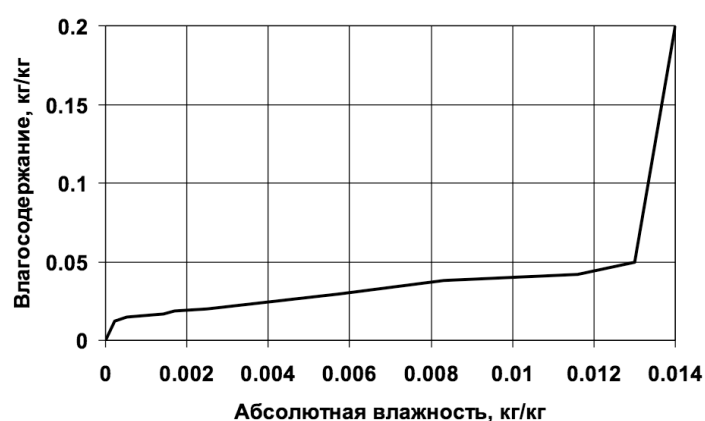
В расчетах кривую сорбции для 20 °С нельзя использовать, т.к. абсолютная влажность, эквивалентная 100 % относительной при температуре 20 °С, равна 14 г/кг, в то время как при 70 °С эта же величина равна уже 210 г/кг. Оценив по [9,10] приведенные результаты сорбционного увлажнения при 20 и 70 °С авторы установили, что при значении времени 168 ч (максимальное значение времени для эксперимента

с температурой 70 °С) соотношение влагосодержаний при 70 и 20 °С в блоке газобетона равно 3,5. Заметим также, что угол наклона экспериментально определенной кривой сорбции при 20 °С повторяет угол наклона кривой составляющей пара в смеси. Учитывая эти особенности: соотношение между влагосодержаниями при различных температурах и повтор угла наклона, авторы в своих расчетах используют кривую сорбции при 70 °С, как на рис. 1, б. Авторы заранее признают неточность такой кривой сорбции, которая нуждается в дополнительной проверке. Представляет интерес определение точек кривой сорбции с помощью идентификации параметров модели. Разработанная модель 2 в стационарном расчете удовлетворяет требованиям соотношения кривой сорбции, а модель 1 – нет.

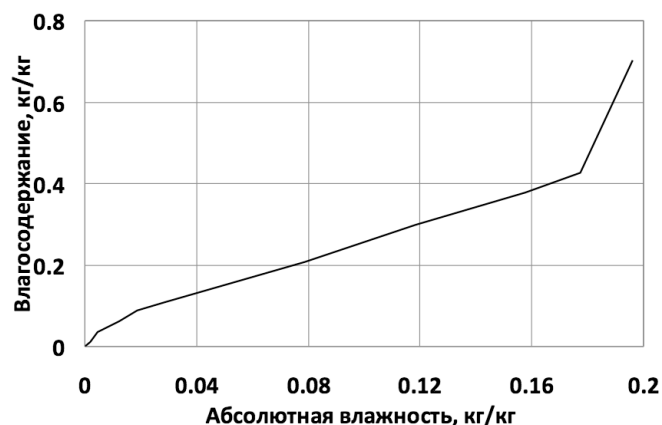
Компьютерная модель образца газобетона выполнена в программе ANSYS-FLUENT.

В табл. 1 приведены варианты решенных задач для сравнительного анализа особенностей моделей и значений их параметров, а также табличное значение коэффициента паропроницаемости для газобетона, приведенное в [1]. Значения коэффициентов, приведенные в таблице 1, идентифицировались по результатам экспериментальных исследований.

Результаты, приведенные на рис. 2 показывают, что разработанная модель с достаточной точностью описывает процесс увлажнения блока пористого газобетона и может быть использована для моделирования теплового и влажностного состояния многослойных ограждаю-



а

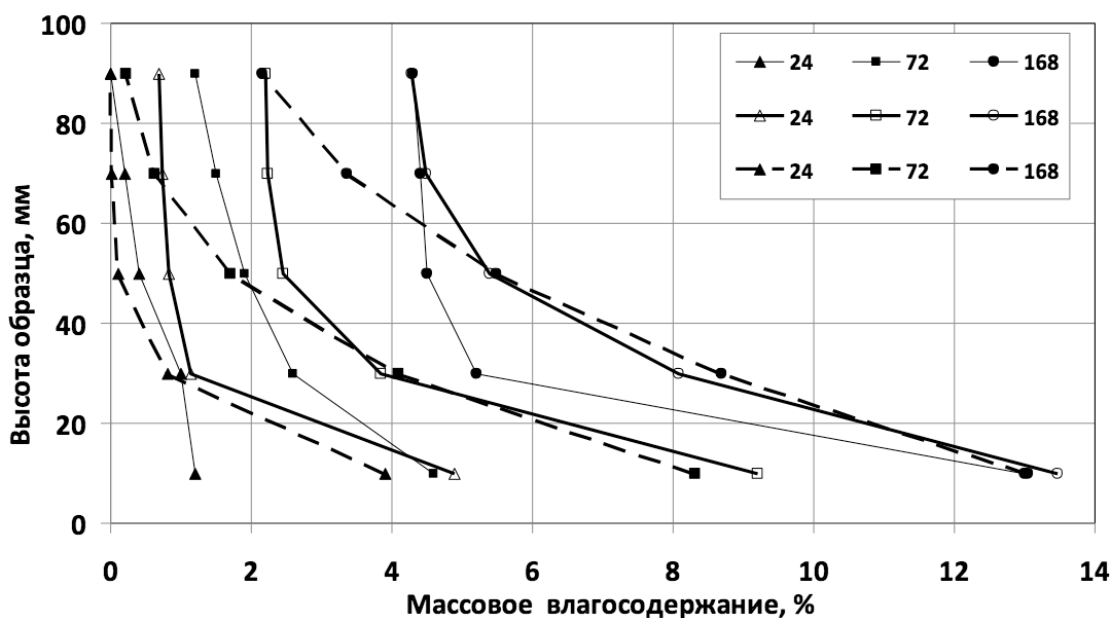


б

Рис. 1. Изотерма сорбции газобетона при температуре 20 (а) и 70 (б) °С.

Табл. 1. Таблица вариантов решенных задач

Вар	Модель	Учет последнего слагаемого в уравнении (6)	Коэффициент паропроницаемости $\delta$ , кг/(м·сек·Па)	Коэффициент интенсивности поглощения (выделения) влаги $k$
	Табличные данные	Нет	$4.7 \cdot 10^{-11}$	-
1	1	Нет	$5 \cdot 10^{-14}$	-
2	1	Да	$1.5 \cdot 10^{-14}$	-
3	2	Нет	-	$2 \cdot 10^{-14}$
4	2	Да	-	$3.5 \cdot 10^{-15}$
5	2	Да	-	$4 \cdot 10^{-14}$



**Рис. 2. Массовое влагосодержание по высоте образца газобетона в различные моменты времени. Тонкие линии – результаты экспериментальных исследований [10]; сплошные – результаты расчетов, полученные с помощью программы ANSYS-FLUENT в сопряженной постановке; прерывистые линии – в несопряженной постановке.**

щих конструкций помещения. Приведенное влагосодержание на оси  $x$  (рис. 2) есть сумма по массе паровой и влажностной составляющих, поскольку в эксперименте влагосодержание определялось весовым методом и гамма просвечиванием, при котором нельзя разделить общее влагосодержание на составляющие. Вариант 5 отличается от варианта 4 в табл. 1 учетом сопряженного массообмена между газобетоном и воздухом (без задания коэффициента массоотдачи от поверхности газобетона). Резкий изгиб кривых на высоте 30 мм для 72 и 168 часов

можно объяснить наличием неплотностей между слоями образца по высоте, в которых могло содержаться некоторое количество воздуха.

Полученный результат был подтвержден моделированием блока газобетона в программе, описанной в [12], в модели которой идентифицировались коэффициенты паро- и влагопроницаемости в зависимости от относительной влажности и влагосодержания, соответственно. Граничные условия на границах задавались с помощью постоянного коэффициента массоотдачи, что объясняет наибольшее расхождение

результатов на нижней и верхней границе газобетона.

Проведенные исследования позволили определить коэффициент массоотдачи, который линейно зависит от разницы концентраций на нижней границе газобетона и среды в нижней камере (рис. 3), а его величина может значительно отличаться от рекомендуемого в литературе значения  $\beta = 1 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>·с·Па. Сопряженная постановка позволяет в данной изотермической за-

даче получить значения коэффициента массоотдачи, которые нельзя оценить в несопряженной постановке из-за отсутствия теплообмена и значения коэффициента конвективной теплоотдачи.

На рис. 4 показано соотношение паровой  $m$  и влажностной  $w$  составляющих по высоте газобетона. Во всех вариантах на нижней границе количество пара больше, чем влаги, поскольку в образец газобетона поступает только пар, часть которого может превратиться во

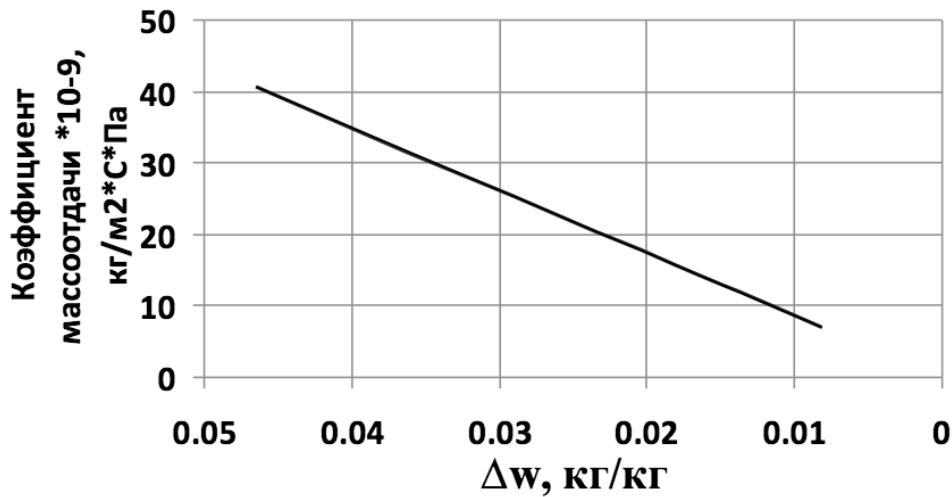


Рис. 3. Зависимость коэффициента массоотдачи от разницы концентраций влаги в нижней камере и на поверхности образца.

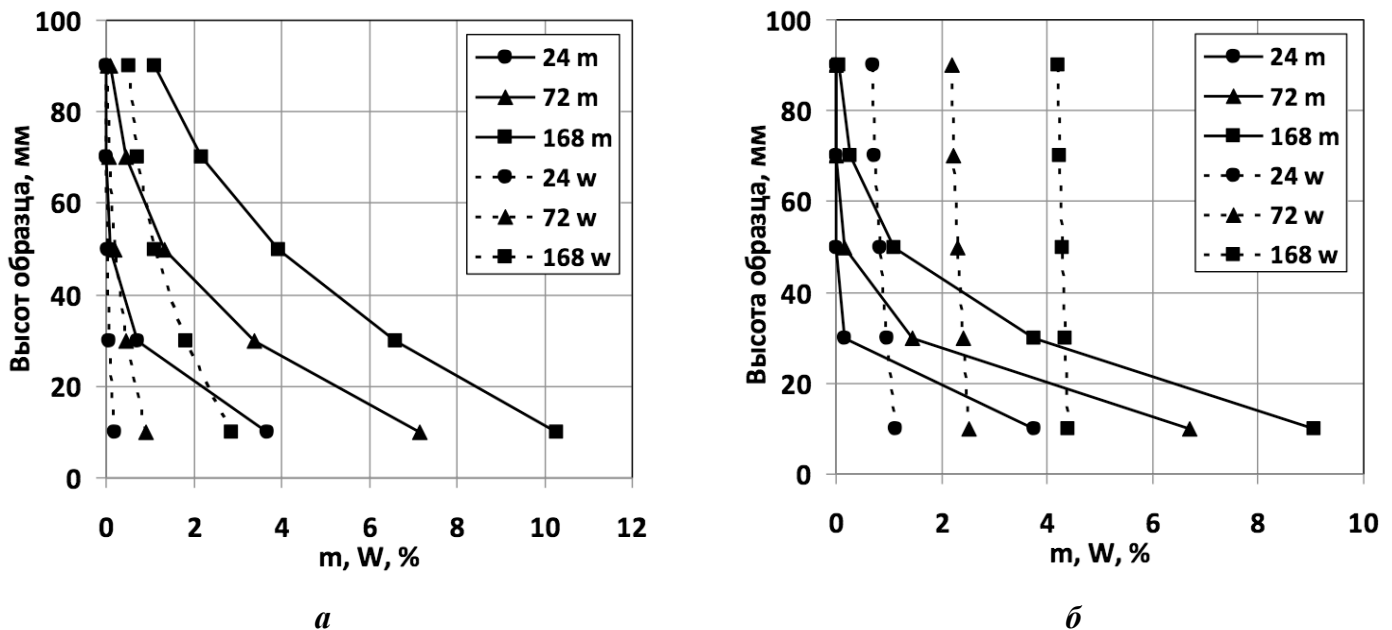


Рис. 4. Зависимость влагосодержания и абсолютной влажности по высоте образца газобетона в различные моменты времени. А – вариант 3, б – вариант 5 из табл. 1.

влагу. Далее по высоте газобетона в варианте 3 количество пара больше, чем количество влаги, поскольку согласно уравнению (3) диффузии пара в паровоздушной смеси не удаляется часть пара, которая переходит во влагу. В варианте 5 в верхней части блока газобетона наблюдается превышение влаги над паром, поскольку насыщенная паровоздушная смесь доходит до верха образца сильно осушенной, в то время как газобетон накапливает влагу, отобранную у паровоздушной смеси, что является более физичным.

Проведенные расчеты показали, что в нестационарном режиме и при своих подобранных значениях коэффициентов  $k$  и  $\delta$  сумма паровой и влажностной составляющих для всех вариантов 1-5 (табл. 1) совпадают друг с другом с достаточной точностью. Результаты моделирования длительного по времени процесса увлажнения газобетона, выполненные в сопряженной постановке в программе ANSYS-FLUENT, приведены на рис. 5.

Предлагаемая авторами модификация модели более физично описывает реальные про-

цессы паро- и влагопереноса в строительном материале (в данном случае образце газобетона). Присутствующий пар в паровоздушной смеси может частично, как превращаться во влагу в строительном материале, так и оставаться в паровой фазе. Влага из газобетона может возвращаться в паровое состояние при наличии соответствующих условий. Т.о., в модели присутствуют и могут быть проанализированы отдельные составляющие: влага в газобетоне и пар в паровоздушной смеси в газобетоне в процессе увлажнения материала.

Модель 1 (уравнения (1) – (3)) использовать в равновесном стационарном режиме нежелательно, поскольку в ней отсутствуют предпосылки для ограничения накопления влаги в материале и выход на соотношение паровой и влажностной составляющей согласно кривой сорбции. Модель 1 также нуждается в идентификации параметров  $\delta$  и  $D_w$  по имеющимся экспериментальным данным. Для решения этой проблемы в программе [12] модифицируют и решают модель 1 относительно относительной влажности, т.е. получают

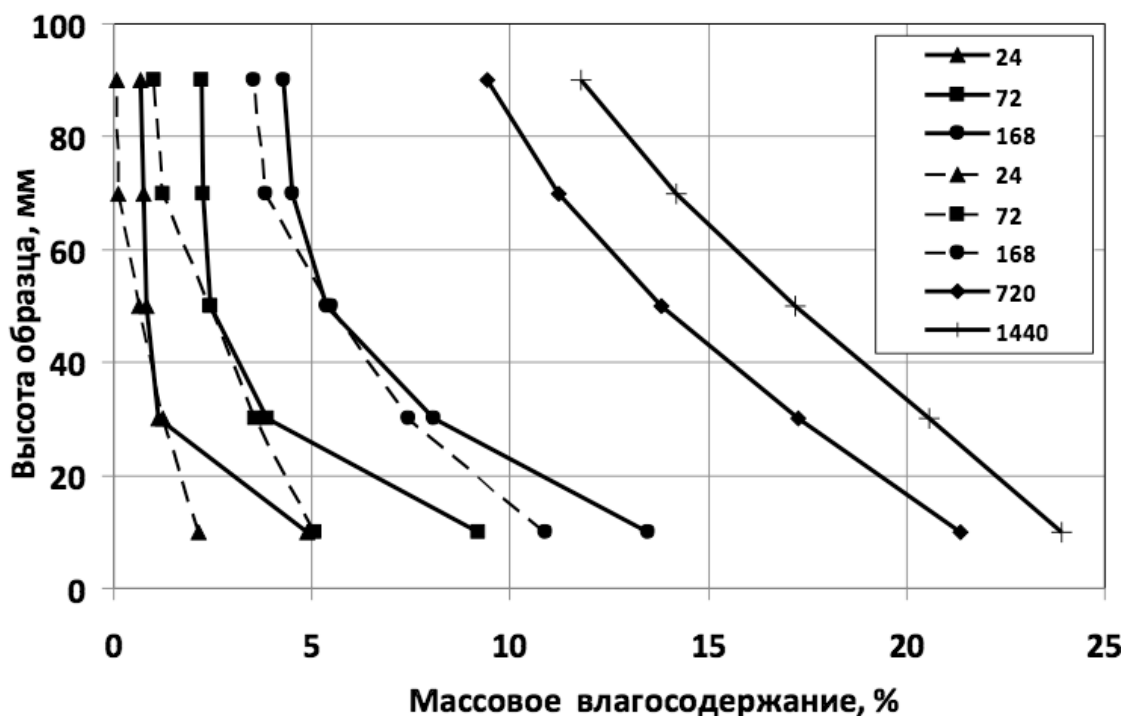


Рис. 5. Зависимость массового влагосодержания по высоте блока газобетона при длительном по времени увлажнении.

возможность использования данных о кривой сорбции материала (в виде  $\delta w/\delta \phi$ ). В таком случае модель 1 выходит на значения максимального влагосодержания отвечающего кривой сорбции. Но модель [12] не дает возможности решать сопряженную задачу, т.к. влага и пар в ней не разделяются. А для сопряженной задачи необходимо знать какое количество пара присутствует в воздухе помещения и в паровоздушной смеси ограждения, и какая его часть переходит во влагу. Разработанная авторами модель в любой момент выполняет соотношение между относительной влажностью и влагосодержанием в газобетоне согласно кривой сорбции. В нестационарном режиме обе модели 1 и 2 дают близкие результаты по распространению влаги в образце газобетона при значениях параметров  $\delta$  и  $k$ , идентифицированных для каждой из моделей.

Специально разработанная в программной среде ANSYS-FLUENT функция, обеспечивающая решение сопряженной задачи паро- и влагопереноса, позволит также решать многомерные сопряженные задачи. Это особенно важно, т.к. накопление влаги и «точка росы» может наблюдаться в углах помещения и на стыках разных элементов конструкций и не наблюдаться на линейных элементах ограждающих конструкций.

Разработанная модель может быть использована в качестве вычислительного «стенда» для проведения вычислений с изменением любых параметров модели. Если ввести зависимость коэффициента  $a$  в формуле (5) от температуры  $A f(w, m, t)$  и  $D_w = f(t)$ , модель позволит получать распределение пара и влаги для различных температур и их перепадов, как это имеет место в реальных процессах. Для практического применения иногда бывает важно рассчитывать и стационарный и квазистационарный режимы, где предложенная авторами модель подходит лучше. Также модель может позволить идентифицировать точки кривой сорбции материалов, что позволит использовать ее с большей точностью.

Дальнейшие работы в данной области будут посвящены верификации сопряженной мо-

дели тепло-, паро- и влагопереноса многослойной ограждающей конструкции натурного экспериментального дома.

### Выводы

1. Рассмотрена CFD- модель, учитывающая процессы сопряженного переноса пара и влаги, поступающего в пористые строительные материалы. В отличие от существующих, рассмотренная модель учитывает соотношение между паровой и влажностной составляющими в соответствии с кривой сорбции, имеющейся для рассматриваемого строительного материала.

2. Приведен анализ особенностей реализации рассмотренной модели в среде программы ANSYS-FLUENT.

3. Приведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными при увлажнении газобетона. Анализ поведения кривых влаго- и паросодержания показал, что предлагаемая авторами модель более физично описывает процесс увлажнения газобетона.

*Авторы статьи выражают свою благодарность д.т.н. Низовцеву М.И. из Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе (Новосибирск) за консультации по вопросам экспериментальных исследований газобетона и полезные советы по работе.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
3. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. – М: Стройиздат, 1984. – 168 с.
4. Woloszyn M., Rode C. Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings // Building Simulation. – 2008. – Vol.1. – С. 5 – 24.
5. ANSYS FLUENT. Theory Guide. Realise 14.0. – 2011. – 862 с.

6. *Steeman H.J., Janssens A., De Paepe M.* Coupling moisture transport in air flows and porous materials using CFD // Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, June 16 – 18. – Copenhagen, Denmark. – 2008. – P. 715 – 722.

7. *Mortensen L.H., Woloszyn M., Rode C., Peuhkuri R.* Investigation of Microclimate by CFD Modeling of Moisture Interactions between Air and Constructions // Journal of Building Physics. – 2007. – Vol. 30. – P. 279 – 315.

8. *Künzel H.M.* Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Building Components: One- and Two dimensional calculation using simple parameters // Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, Germany. – 1995. – 65 p.

9. *Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И.* Верификация модели расчета сопряжен-

ного тепло- и влагопереноса при увлажнении газобетона // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – №1 (589). – С. 105 – 110.

10. *Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Терехов В.И.* Влияние градиента температуры на влагоперенос в пористых материалах // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/1. – С. 17 – 21.

11. *ГОСТ 24816-81* Метод определения сорбционной влажности // М.: Издательство стандартов. – 1988. – 20 с.

12. *Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program // Energy and Building. – 2001. – Vol 33. – P. 319 – 331.

## CFD-SIMULATION OF COUPLED VAPOR AND MOISTURE TRANSFER IN POROUS BUILDING MATERIALS

**Krukovsky P.G., Polubinskiy A.S., Tadlia O.Y., Kovalenko V.N.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

CFD-model is considered which takes into account the coupled transport processes separately vapor and moisture received in porous building materials. The implementation of the developed model in ANSYS-FLUENT is analyzed. Model modification proposed by the authors more physically describes the actual

processes of the heat and moisture transfer in the construction material (in this case - gas concrete) and the environment. Vapor in a vapor-air mixture may be partially converted into moisture in the building material or remain there in the vapor phase. Moisture from gas concrete can be returned to the vapor state in the appropriate conditions. Therefore, separate components are presented in the model and can be analyzed: moisture in the gas concrete and vapor in the vapor-air mixture in the gas concrete during humidification material. The created model may be used as computational "sample" for calculations with a change of any model parameters. It is shown a sufficient agreement between the simulation results and experimental data on wetting gas concrete.

References 12, table 1, figures 5.

**Key words:** porous building materials, vapor and moisture transfer, sorption curve, CFD-modeling

1. *Fokin K.F.* Construction thermotechnics of the building envelope parts. // M. AVOK PRESS, 2006. – 256 p.

2. *Bogoslovskiy V.N.* Building thermal physics (thermal fundamentals of heating, ventilation and air conditioning) – M.: Vischaya shkola, 1982. – 415 p.

3. *Manual of analysis moisture regime of building envelopes.* – M: Stroyizdat, 1984. – 168 p.

4. *Woloszyn M., Rode C.* Tools for Performance Simulation of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings // Building Simulation. – 2008. – Vol.1. – P. 5 – 24.

5. *ANSYS FLUENT.* Theory Guide. Realise 14.0. – 2011. – 862 p.

6. *Steeman H.J., Janssens A., De Paepe M.* Coupling moisture transport in air flows and porous materials using CFD // Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, June 16 – 18. – Copenhagen, Denmark. – 2008. – P. 715 – 722.

7. *Mortensen L. H., Woloszyn M., Rode C., Peuhkuri R.* Investigation of Microclimate by CFD Modeling of Moisture Interactions between Air and Constructions // Journal of Building Physics. – 2007. – Vol. 30. – P. 279 – 315.

8. *Künzel H.M.* Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Building Components: One- and Two dimensional calculation using simple parameters // Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, Germany. – 1995. – 65 p.

9. *Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I.* Verification of the model calculation of coupled heat and moisture on the gas concrete humidification // Izvestia vuzov. Stroitelstvo. – 2008. – № 1 (589). – P. 105 – 110.

10. *Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N., Terekhov V.I.* Effect of temperature gradient on moisture transfer in porous materials // Polzunovskiy vestnik. – 2012. – № 3/1. – P.17 – 21.

11. *GOST 24816-81* Method of determining moisture sorption // Moscow: Izdatelstvo standartov. – 1988. – 20 p.

12. *Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J.* EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program // Energy and Building. – 2001. – Vol 33. – P. 319 – 331.

Получено 20.11.2014

Received 20.11.2014

УДК. 663.5

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КРАХМАЛОСОДЕРЖАЩИХ СРЕД МЕТОДОМ ДИСКРЕТНО – ИМПУЛЬСНОГО ВВОДА ЭНЕРГИИ

Ободович А.Н., д.т.н., Лымарь А.Н., Костик С.И., Сидоренко В.В.

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

Розглянуто можливість застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії при обробці крахмаловмісних середовищ. Представлені результати досліджень по гідролізу крахмалосодержащих середовищ. Доведено ефективність застосування методу на даному етапі виробництва спирту.

Рассмотрена возможность применения метода дискретно-импульсного ввода энергии при обработке крахмалосодержащих сред. Представлены результаты исследований по гидролизу крахмалосодержащих сред. Доказана эффективность применения метода.

The possibility in the processing of starch media has been considered. The results of studies on the hydrolysis of starch media are presented. The effectiveness of the method is proved.

Библ. 5, табл. 3, рис. 4.

**Ключевые слова:** дискретно-импульсный ввод энергии, гидролиз, сусло.

Вопросы энерго- и ресурсосбережения всегда были и, на сегодняшний день, остаются актуальными для всех отраслей промышленности. Наукой и практикой уже доказано, что метод ДИВЭ позволяет частично решать данные проблемы в фармацевтической, пищевой, химической и др. отраслях промышленности [1,2,3]. Изучение теплофизических процессов в сложных гетерогенных системах при воздействии механизмов ДИВЭ позволяет совершенствовать существующие и разрабатывать новые технологии и продукты.

Исходя из вышеизложенного, перед нами стояла задача исследования возможности применения метода ДИВЭ при переработке крахмалосодержащих зерновых культур.

Зерновые культуры являются одним из основных видов сырья для хлебопекарной, бродильной, крахмалопаточной и других отраслей промышленности. Зерновые культуры имеют различную форму зерна, но состоят из одинаковых анатомических частей: оболочки, зародыша и эндосперма.

Химический состав зерновых культур зависит от экологических (климатических и почвенных) и метеорологических условий. Он характеризуется такими основными группами веществ, как углеводы, жиры, белки и зольные элементы. Основную часть углеводов (около 98 %) составляет крахмал. [4].

Переработка зерна практически во всех отраслях промышленности связана с диспергированием, смешиванием с водой или другой жидкой фазой, термообработкой и, при необходимости, гидролизом. Вышеуказанные технологические стадии переработки зерна осуществляется на отдельном оборудовании по установленным режимам.

Метод ДИВЭ, разработанный в ИТТФ НАН Украины, позволяет проводить данные технологические операции в одном РПА [5].

По традиционному способу переработки зерна в спиртовой промышленности его сначала измельчают, а затем смешивают с водой, проводят термообработку и гидролизуют. Переработка зерна с применением метода ДИВЭ осуществляется несколько иначе, чем по классической схеме

В приёмный бункер РПА задают воду, открывают кран и включают РПА. Вода рециркулирует по контуру через рабочие органы РПА. Затем открывают двухходовой кран и из бункера подают зерно в поток рециркулирующей воды. Количество зерна и воды составляет 1 – 2 соответственно.

Водозерновая смесь проходит через рабочие органы РПА в режиме рециркуляции, где происходит одновременное измельчение зерна, смешивание его с водой, растворение химических соединений и нагрвание смеси.

Нагревание смеси происходит за счёт энергии диссипации.

Обработку смеси ведут до температуры начала клейстеризации крахмала 45...50 °С, затем задают ферментный препарат – термостойкую бактериальную  $\alpha$ -амилазу. Ферментный препарат  $\alpha$ -амилаза разжижает крахмал и не даёт ему клейстеризоваться, а также частично его гидролизует. После добавления  $\alpha$ -амилазы обработку смеси продолжают до температуры 80...85 °С. Такая температура необходима для разваривания крахмальных зёрен и перевода крахмала в растворённое состояние.

По достижению температуры 80...85 °С в раствор добавляют ещё одну часть воды и охлаждают его до температуры 55...60 °С. После этого добавляют ферментный препарат глюкоамилазу и переводят гидролиз крахмала до получения сбраживаемых углеводов. Далее готовое сусло охлаждают и подают на сбраживание.

Отличительная особенность приготовления сусла спиртового производства с применением метода ДИВЭ состоит в том, что все технологические операции (диспергирование, перемешивание, растворение, нагревание, гидролиз) проходят в одном РПА.

Более подробно остановимся на наиболее важном и сложном в технологии спирта процессе гидролиза крахмала.

По классической технологии на процесс гидролиза крахмала и крахмалосодержащих соединений оказывают влияние следующие факторы: температура, рН, природа и количество катализатора, продолжительность во времени [4]. По разработанному способу гидролиз будет проводиться с применением метода ДИВЭ и его механизмов.

При проведении исследований примем, что катализаторами будут ферментные препараты  $\alpha$ - и глюкоамилазы. Оптимумом их действия является рН 5,0...5,5 и температура 70...85 °С для  $\alpha$ -амилазы и 55...58 °С для глюкоамилазы.

В процессе обработки гидролизуемой среды в РПА будем менять продолжительность процесса, частоту пульсаций, скорость сдвига потока, угловую скорость, зазор между статором и ротором. Частота пульсаций зависит от скорости вращения ротора и количества отверстий в

рабочих органах. Скорость сдвига потока зависит от угловой скорости вращения ротора, радиуса ротора и зазора между статором и ротором.

В таблице 1 показана зависимость количества прогидролизованного крахмала в % от продолжительности процесса и частоты пульсаций потока среды в РПА.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что с увеличением продолжительности процесса гидролиза увеличивается количество прогидролизованного крахмала. Без обработки в РПА (частота пульсаций 0) за 15 мин. гидролизуется 78 % крахмала. С увеличением частоты пульсаций от 1 до 5 кГц количество прогидролизованного крахмала увеличится до 96 %.

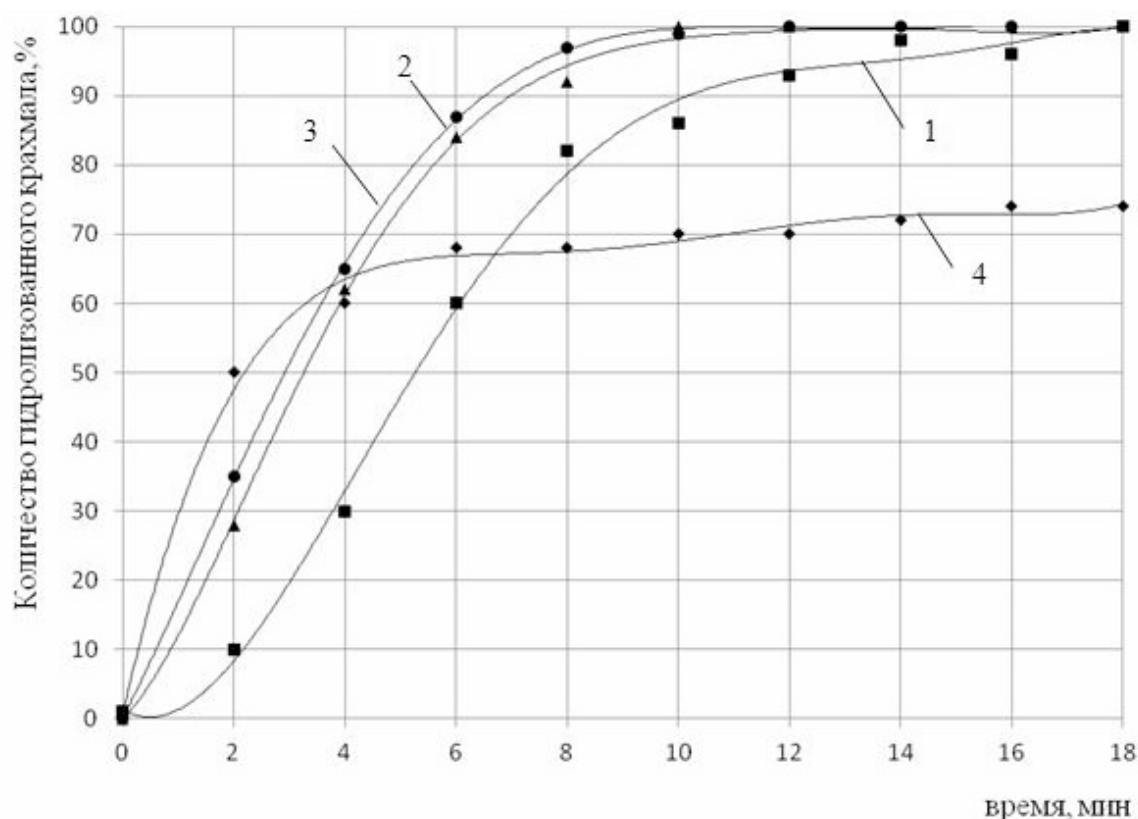
Из таблицы видно, что при частоте пульсаций 3...5 кГц продолжительность осахаривания можно сократить до 10...12 мин. и достичь величины 96 % прогидролизованного крахмала. Таким образом, проведение процесса гидролиза крахмалосодержащего сырья в РПА с частотой пульсаций потока 3...5 кГц позволяет повысить процент прогидролизованного крахмала от 78 до 96 и сократить продолжительность от 15 до 10...12 мин.

В дальнейших исследованиях было изучено воздействие угловой скорости вращения ротора на гидролиз крахмалосодержащих соединений.

Из графика можно сделать вывод о том, что с увеличением скорости вращения ротора продолжительность гидролиза уменьшается, а количество прогидролизованного крахмала увеличивается. Эффективность процесса гидролиза существенно улучшается при увеличении угловой скорости от  $30 \cdot 2\pi$  до  $50 \cdot 2\pi$  об/с. Увеличение угловой скорости до  $70 \cdot 2\pi$  об/с практически процесс гидролиза не улучшает. При повышении угловой скорости до  $90 \cdot 2\pi$  об/с наблюдается уменьшение количества прогидролизованного крахмала от 96 до 60 %. По мнению авторов, вышеописанное можно объяснить тем, что при небольшом увеличении угловой скорости вращения ротора от  $30 \cdot 2\pi$  до  $50 \cdot 2\pi$  об/с повышается массообмен перерабатываемой среды, в результате чего улучшается взаимодействие между активным центром фермента и субстратом. То есть в единицу времени количество разорванных ацетальных связей (С – О)  $\alpha$  1 – 4 и (С – С)  $\alpha$  1 – 6 увеличивается.

Табл. 1. Зависимость количества прогидролизованного крахмала (в %) от продолжительности процесса и частоты пульсаций потока среды в РПА

Частота пульсаций, кГц	Время, мин					
	3	5	7	10	12	15
0	7	20	41	67	73	78
1	17	39	75	76	80	89
3	25	47	88	91	96	96
5	28	49	89	92	96	96



**Рис. 1. Зависимость количества прогидролизованного крахмала (%) от угловой скорости вращения ротора и продолжительности гидролиза:**  
 1 –  $30 \cdot 2\pi$  об/с; 2 –  $50 \cdot 2\pi$  об/с; 3 –  $70 \cdot 2\pi$  об/с; 4 –  $90 \cdot 2\pi$  об/с.

Однако, увеличение угловой скорости до  $90 \cdot 2\pi$  об/с способствует ухудшению процесса гидролиза. По видимому, большие угловые скорости приводят к разрушению активного центра фермента и снижению его активности.

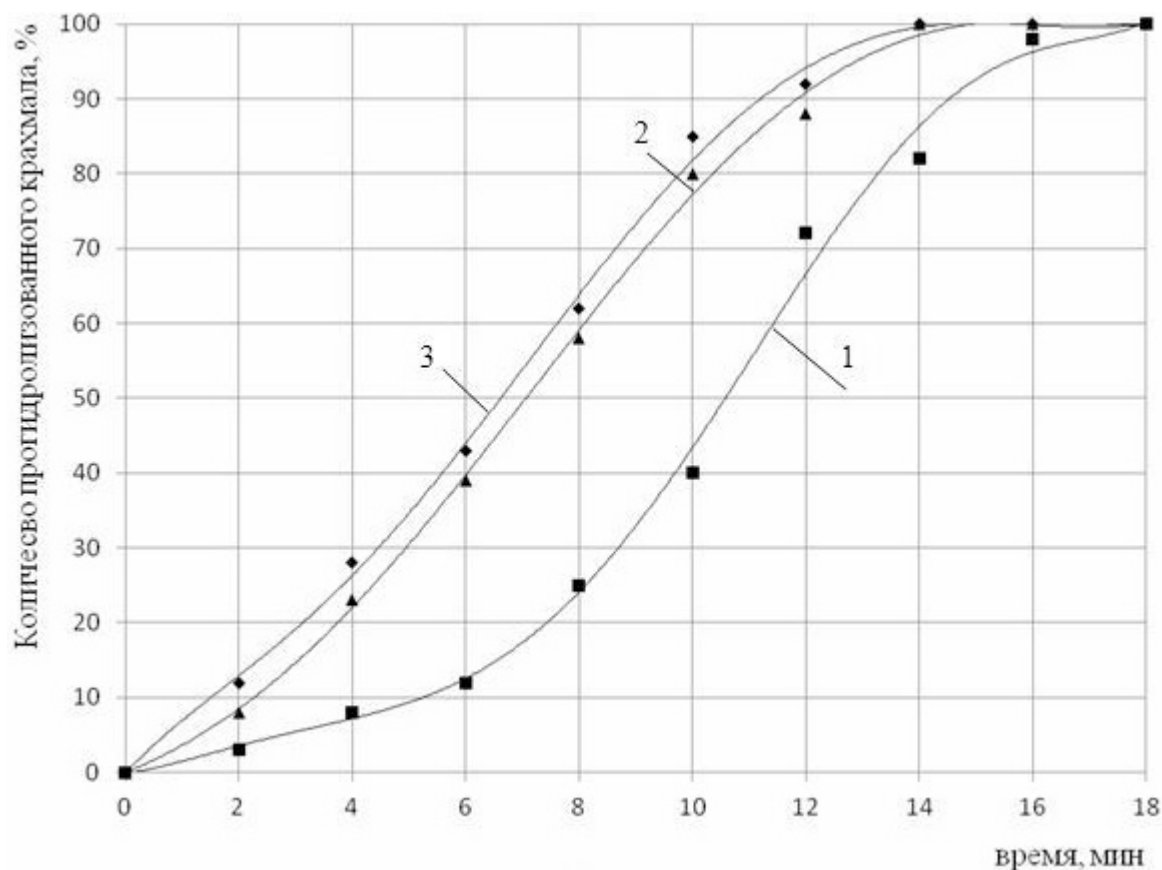
Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективно проходит процесс гидролиза крахмала при угловой скорости вращения ротора  $50 \cdot 2\pi$  об/с. Одним из факторов, влияющих на обработку гетеро-

генных сред в РПА является величина зазора между статором и ротором.

При проведении данных исследований угловая скорость вращения ротора оставалась постоянной и составляла  $50 \cdot 2\pi$  об/с.

График зависимости количества прогидролизованного крахмала (%) от продолжительности гидролиза и зазора между статором и ротором представлена на рис. 2.

Уменьшение зазора между статором и ро-



**Рис. 2. Зависимость количества прогидролизованного крахмала (%) от продолжительности гидролиза и зазора между статором и ротором: 1 – 500 мкм; 2 – 300 мкм; 3 – 100 мкм.**

тором от 500 до 300 мкм положительно влияет на процесс гидролиза крахмала. Позволяет гидролизовать его на 97...98 % и снизить продолжительность процесса от 18 до 13...14 мин. Уменьшение зазора меньше 100 мкм нецелесообразно, т.к. большая вязкость среды будет затруднять её перемешивание и перекачивание.

Угловая скорость вращения ротора и зазор между статором и ротором объединяет новая введенная величина – скорость сдвига потока  $\gamma$  ( $\text{с}^{-1}$ ).

Дальнейшими исследованиями было определено влияние скорости сдвига потока обрабатываемой среды в РПА на процесс гидролиза крахмала. Скорость сдвига потока меняли путём изменения угловой скорости вращения ротора, внутреннего радиуса ротора и величины зазора между статором и ротором. Она составляла  $30, 50, 70 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ .

Зависимость количества прогидролизован-

ного крахмала от продолжительности процесса и скорости сдвига потока представлена в таблице 2.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что увеличение скорости сдвига потока от  $0$  до  $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  существенно увеличивает количество прогидролизованного крахмала от 75 до 96 % и сокращает продолжительность процесса на 20 %. С увеличением скорости сдвига потока до  $70 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  количество прогидролизованного крахмала практически не увеличивается.

Анализируя экспериментальные данные, отражённые в таблицах и графиках приходим к выводу, что процесс гидролиза крахмалосодержащего сырья наиболее эффективно проводить при обработке среды в РПА при скорости сдвига потока  $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  и частоте пульсаций 3 кГц.

Ранее было указано, что с уменьшением среднего размера частиц зерна и повышением температуры начинается клейстеризация крах-

Табл. 2. Зависимость количества прогидролизованного крахмала (в %) от продолжительности процесса и скорости сдвига потока

Скорость сдвига потока $\gamma$ (с <sup>-1</sup> )	Продолжительность гидролиза, мин					
	3	5	7	10	12	15
0	6	23	45	61	70	75
$30 \cdot 10^3$	17	48	67	85	90	94
$50 \cdot 10^3$	21	44	75	92	96	96
$70 \cdot 10^3$	23	46	76	93	96	97

мала. Это приводит к резкому увеличению вязкости среды, что влечёт за собой трудности в её переработке. Поэтому, с целью разжижения и гидролиза среды, в неё добавляют ферментные препараты  $\alpha$  – амилазу и глюкоамилазу. Вследствие вязкость разжиженных и гидролизованных крахмальных растворов уменьшается до 0,2...0,3 Па·с. Это позволяет готовый продукт легко перемешивать и перекачивать.

Экспериментально установлено, что для приготовления 1 т. суслу с применением метода ДИВЭ необходимо затратить 4,7 кВт электроэнергии. Данный показатель по существующей технологии составляет 6,5 кВт·час.

Для спиртового завода производительностью 3000 дал спирта в сутки необходимо 300 т. суслу.

Суточная потребность в электроэнергии для приготовления суслу по существующей технологии составляет  $6,5 \cdot 300 = 1950$  кВт·ч, по предлагаемой  $4,7 \cdot 300 = 1410$  кВт·ч.

В среднем спиртовые заводы работают 300 суток в год.

$1950 \cdot 300 = 585000$  кВт·ч – существующая технология,  $1410 \cdot 300 = 423000$  кВт·ч – предлагаемая технология.

Итого годовая экономия энергозатрат для одного спиртового завода составляет 162000 кВт·ч.

В Украине работает 40 спиртовых заводов. Годовой экономический эффект по Украине составляет  $162000 \cdot 40 = 6480000$  кВт·ч.

При проведении процесса гидролиза крахмалосодержащих соединений количество ферментного препарата задавали по принятым в спиртовой промышленности для осахаривания суслу нормам. На 1 тонну крахмала 1 кг  $\alpha$ -амилазы и 1 кг глюкоамилазы. Затраты осахаривающих материалов наиболее правильно рассчи-

тывать по единицам их активности на единицу массы крахмала. Одним из показателей активности ферментов, отвечающих за гидролиз крахмала, является осахаривающая активность (ОА), которая характеризует способность всех амилолитических ферментов катализировать гидролиз крахмала до редуцирующих веществ. Активность осахаривающих материалов характеризуют числом единиц осахаривающих ферментов, находящихся в 1 г ферментного препарата.

За единицу осахаривающей активности принимают такое количество ферментов, которые в строго определенных условиях (температура – 30, рН – 4,7...4,9, период действия – 60 мин) катализуют гидролиз 1 г крахмала, который не превышает 30 % введенного в ферментативную реакцию. Как правило, осахаривающая активность амилолитических ферментных препаратов составляет от 0,1 до 8,0 ед./100 см<sup>3</sup>). При использовании ферментных препаратов для гидролиза крахмала определяют осахаривающую активность и, исходя из этого, рассчитывают их количество.

Ранее проведенные исследования показали, что применение метода ДИВЭ позволяет увеличить скорость реакции гидролиза крахмала почти в 2 раза. Продолжительность реакции уменьшается с 20 до 10 мин.

Используя РПА, мы улучшаем взаимодействие фермента и субстрата. Т.е. в принудительном порядке за счет скорости и частоты пульсаций потока заставляем одно и то же количество фермента гидролизовать в единицу времени большее количество связей (С – О) и (С – С). Иными словами повышаем активность фермента. При этом возникает вопрос о том, можно ли с увеличением активности фермента уменьшить его количество при гидролизе еди-

ницы крахмала.

Для этого были проведены исследования по уменьшению (от установленной нормы) количества ферментных препаратов на 5, 10, 15 и 20 %. Данные экспериментов представлены на рисунке 3.

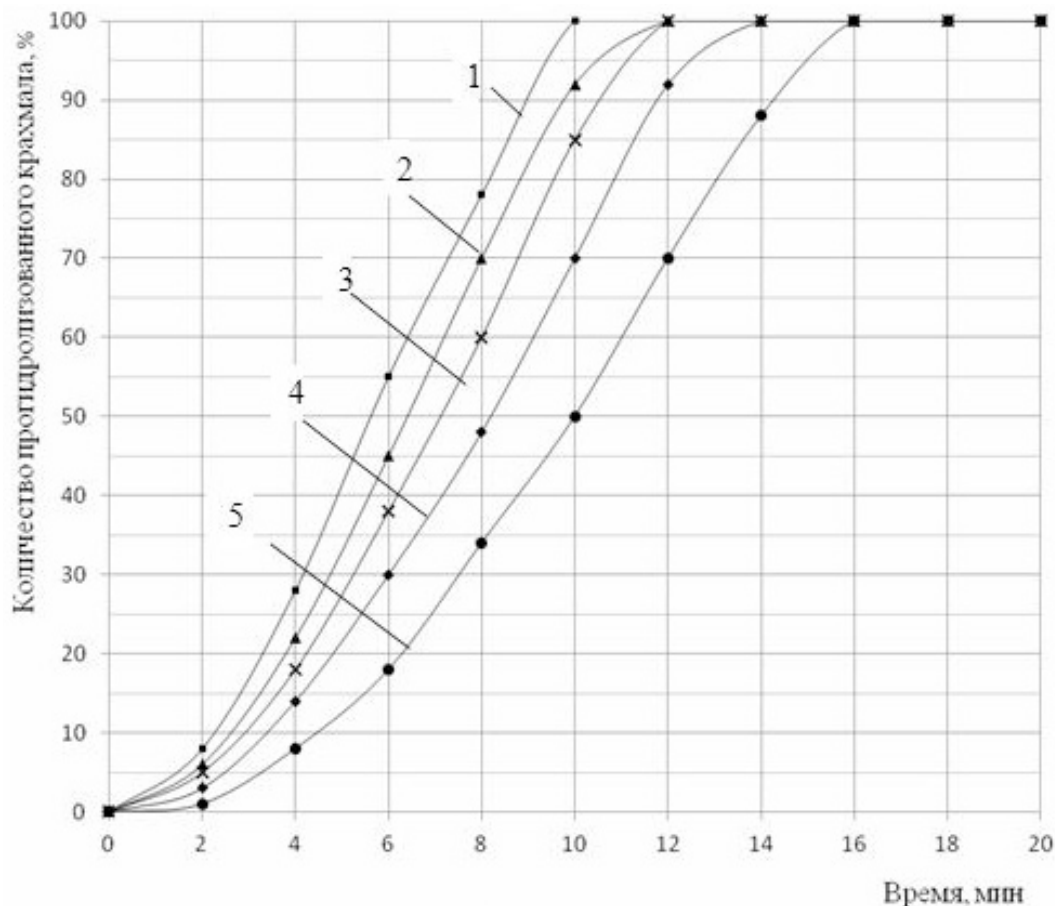
Из графика видно, что при снижении содержания ферментного препарата от 100 до 80 % продолжительность времени для проведения гидролиза увеличивается от 10 до 15 мин. Уменьшение количества ферментного препарата на 5...15 % возможно практически без изменения продолжительности процесса.

Таким образом, применение метода ДИВЭ эффективно при гидролизе крахмалосодержащего сырья. Данный метод позволяет сократить

продолжительность процесса в 2 раза, увеличив при этом количество прогидролизованного крахмала от 76 до 97 %.

В процессе исследований установлено, проведение процесса гидролиза с применением метода ДИВЭ позволяет с одинаковым количеством ферментных препаратов проводить реакцию в 2 раза быстрее и с большим количеством прогидролизованного крахмала. Это наводит на мысль, что активность ферментов в результате воздействия механизмов ДИВЭ может изменяться.

Поэтому следующим этапом исследований было определение влияния механизмов ДИВЭ на осаживающую активность амилолитических ферментных препаратов. Из механизмов



**Рис. 3. График зависимости количества прогидролизованного крахмала от времени при затратах ферментных препаратов: 1 – 100 %; 2 – 95 %; 3 – 90 %; 4 – 85 %; 5 – 80 %. При проведении исследований, гидролиз крахмалосодержащего сырья проводили методом ДИВЭ при частоте пульсаций 3 кГц, скорости сдвига потока  $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ , амплитуде перепада давлений  $\Delta P$  520 кПа.**

ДИВЭ были выбраны частота пульсаций и скорость сдвига потока среды в РПА.

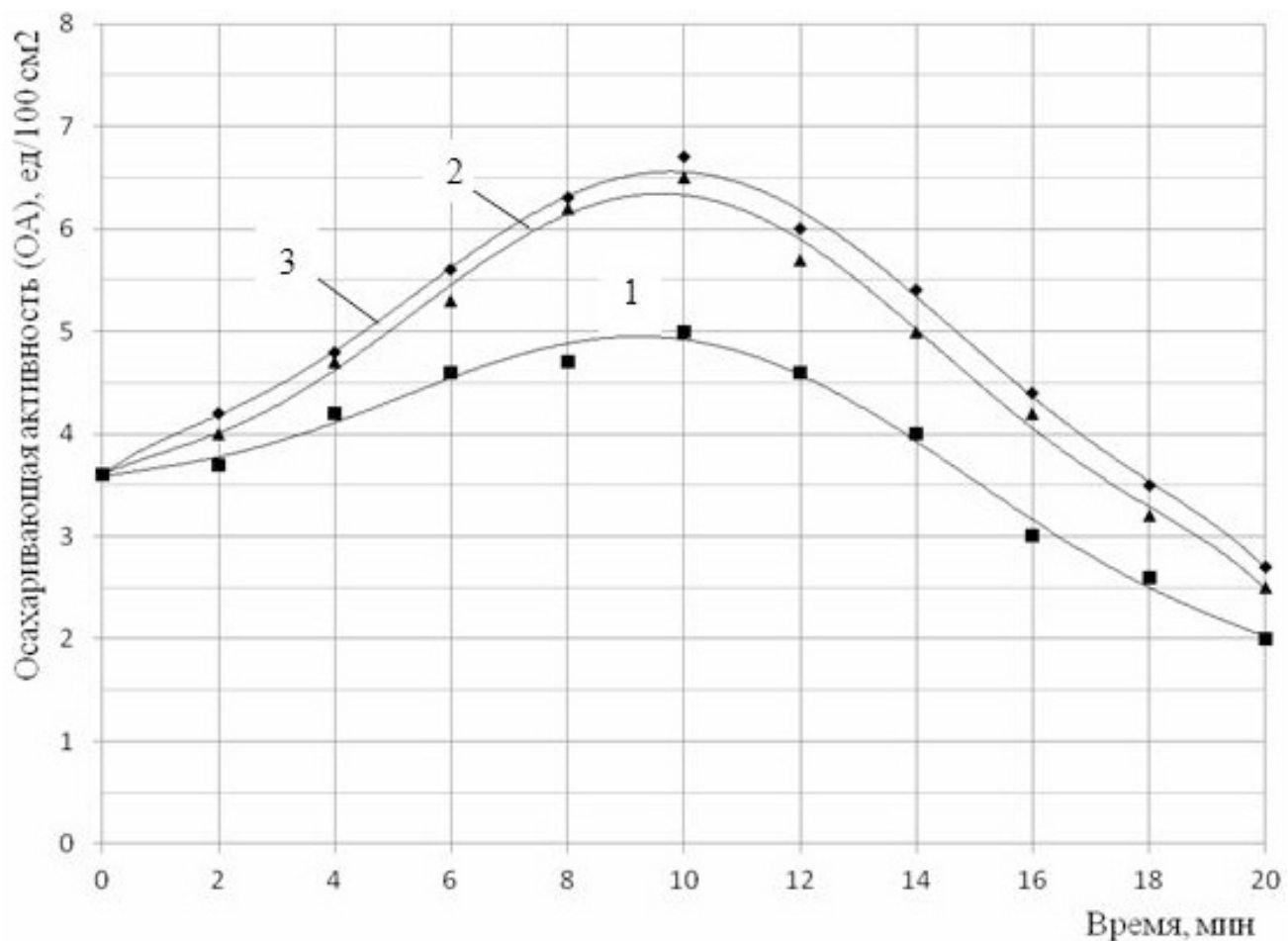
График зависимости осажаривающей активности (ОА) ферментов от продолжительности процесса и частоты пульсаций среды в РПА представлен на рис. 4. При проведении исследований измеряли начальную осажаривающую активность ферментных препаратов. Она составляла 3,4 ед./100 см<sup>3</sup>.

ОА препаратов при проведении процесса гидролиза сначала увеличивается почти в 2 раза, а затем уменьшается. При проведении гидролиза с частотой пульсаций среды 3...5 кГц наибольшая ОА ферментов наблюдается на 10...12 мин. обработки. Затем она падает. При проведении гидролиза с частотой пульсаций 1 кГц ОА увеличивается меньше и на 15 минуте обработки.

Тоже происходит ее уменьшение. По мнению авторов это объясняется тем, что до определенного момента (частота пульсаций и продолжительность) активный центр фермента чаще встречается с ацетальной связью в молекуле крахмала и разрывает ее. Повышенная частота пульсаций и продолжительность гидролиза по видимому ингибирует активный центр фермента.

Для доказательства правильности данного предположения было исследовано влияние скорости сдвига потока и продолжительности гидролиза на ОА ферментов (табл. 3).

Данные таблицы подтверждают выдвинутые ранее предположения о том, что воздействие механизмов ДИВЭ на фермент сначала повышает его и активность до определенных пределов, а затем разрушает активный центр фермента, вследствие чего активность падает.



**Рис. 4.** Зависимость осажаривающей активности от продолжительности процесса гидролиза, при частоте пульсаций: 1 – 1 кГц; 2 – 3 кГц; 3 – 5 кГц.

Табл. 3. Зависимость осахаривающей активности ферментов от скорости сдвига потока и продолжительности гидролиза

Скорость сдвига потока, $10^3 \text{ с}^{-1}$	Время, мин								
	0	3	5	7	10	12	15	17	20
30	3,4	3,5	4,2	4,8	5,5	6,0	5,3	4,5	3,4
50	3,4	3,7	4,5	5,3	6,1	6,0	5,2	4,0	2,1
70	3,4	3,9	4,8	6,0	6,0	5,1	3,5	2,1	0,5

### Выводы

Приведенные исследования убедительно доказывают, что применение метода ДИВЭ при переработке зернового крахмалосодержащего сырья позволяет интенсифицировать процесс и снизить энергозатраты. В работе показана возможность проведения четырех технологических этапов переработки зерна (диспергирование, перемешивание, растворение, нагревание, гидролиз) в одном РПА. Изучено действие ДИВЭ и конструктивных особенностей РПА на процесс гидролиза крахмала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б.И. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологии броидильного производства / Б.И. Басок, Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р. // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4 (приложение №1). – С. 94 – 99.

2. Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления суслу из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии / А.Н. Ободович, Т.Л. Грабова, А.Р. Коба // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 6. – С. 81 – 87.

3. Ободович А.Н. ДИВЭ – интенсифицирующий метод гидролиза высокомолекулярных соединений / А.Н. Ободович, А.Ю. Лымарь // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 23 – 30.

4. Мальцев П.М. Технология броидильных производств / П.М. Мальцев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 569 с.

5. Долинский А.А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация: монография / А.А. Долинский, А.Н. Ободович, Ю.А. Борхаленко. – Х.: Віровець А.П. “Апостроф”. – 2012. – 185 с.

**REDUCTION OF ENERGY CONSUMPTION  
IN THE PROCESSING OF STARCH MEDIA  
BY METHOD OF DISCRETE – PULSED  
ENERGY INPUT****Obodovich A.N., Lymar A.J., Kostyk S.I.,  
Sidorenko V.V.**

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

The article presents the results of applying the method of discrete-pulsed energy input (DIVE) in the processing of starch media. Examine the extent that they affect the DIVE on the degree of hydrolysis of starch saccharifying activity of enzyme preparations. The paper shows the possibility of four process stages of grain processing (dispersion, mixing, dissolving, heating, hydrolysis) in one apparatus. These data clearly show that the application of the method in the processing DIVE grain starch raw materials allows to intensify the process and reduce energy costs. References 5, tabl. 3, fig. 4.

**Key words:** discrete-pulse energy input, hydrolysis, wort.

1. *Basok B.I.* Discrete-pulse energy input into the production of fermentation technology/ Basok B.I., Obodovich A.N., Pirogenko I.A., Koba I.A.// Promyshlennaya teplotekhnika. – 2003. – V. 25, № 4 (enclosure №1). – P. 94 – 99 (Rus.)

2. *Obodovich A.N.* Improving the technology of preparation of the wort from starch raw material in alcohol production using the method of discrete-pulsed energy input / Obodovich A.N., Grabova T.L., Koba I.A. // Prom. teplotekhnika – 2009. – V. 31, № 6. – P. 81 – 87(Rus.)

3. *Obodovich A.N.* DIVE – intensifying method of hydrolysis of high-molecular compounds / Obodovich A.N. Lymar A.J. // Prom. teplotekhnika. – 2013. – V. 35, № 6 – P. 23 – 30 (Rus.)

4. *Malsev P.M.* Fermentation Technology / Malsev P.M. – Second edition revised and supplemented. – Moscow: Food industry, 1980. – 569 (Rus.)

5. *Dolinskiy A.A.* The method of discrete-pulsed energy input and its implementation: Monograph/ Dolinskiy A.A., Obodovich A.N., Borkhalenko J.A. – Kharkov: Vyrovnets A.P. “Aposrof”/ – 2012. – 185 p (Rus.)

*Получено 08.10.2014*

*Received 08.10.2014*

УДК 620.92

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ ИЗ БИОМАССЫ. ЧАСТЬ 2.

Гелетуха Г.Г., канд. тех. наук, Железная Т.А., канд. тех. наук, Дроздова О.И.

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

Розглянуто питання енергетичної ефективності технологій виробництва біогазу та рідких біопалив першого покоління. Оцінено рівень скорочення викидів парникових газів при заміщенні традиційних палив біомасою.

Рассмотрен вопрос энергетической эффективности технологий производства биогаза и жидких биотоплив первого поколения. Оценен уровень сокращения выбросов парниковых газов при замещении традиционных топлив биомассой.

The paper covers the issue of energy efficiency of biogas production and production of first generation liquid biofuels. Assessment of GHG balance when replacing fossil fuels by biomass is performed.

Библ. 8, табл. 6, рис. 1.

**Ключевые слова:** биомасса, биогаз, биотопливо, биоэнергетические технологии, энергетический анализ, коэффициент выхода энергии, оценка жизненного цикла, парниковый газ.

$Q_{BE}$  – теплотворная способность биоэтанола;  
БГ – биогаз;  
БГУ – биогазовая установка;  
ПГ – парниковый газ;

ФТ – Фишер-Тропш;  
ТБО – твердые бытовые отходы;  
э/э – электроэнергия;  
у.т. – условное топливо.

### *Энергетическая эффективность производства биогаза*

Оценка жизненного цикла технологий производства биогаза выполнена в работе [1] для условий Германии. Рассмотрено получение биогаза из силоса кукурузы с последующим производством электрической энергии двигателем мощностью 255 кВт<sub>э</sub>. Для трех районов Нижней Саксонии проанализировано влияние местных условий, в первую очередь качества почвы, климатических условий, применяемой технологии выращивания и, соответственно, урожайности кукурузы на энергетические и экологические показатели биогазовых технологий. Другим важным фактором, который влиял на результаты исследования, была доля полезно утилизированной тепловой энергии, которая считалась побочным продуктом работы БГУ.

Проведенные расчеты показали, что энергетическая эффективность исследованных технологий производства биогаза находится на грани допустимых значений. Величина коэффициента выхода энергии  $EYC_{NR}$  для всех рассмотренных вариантов колеблется в районе 2 (меньше ре-

комендуемого значения для биоэнергетических технологий) (табл. 1). Самый высокий показатель (2,2) получен для биогазовой установки в Göttingen, где затраты невозобновляемой энергии на выращивание кукурузы наименьшие, а доля полезной утилизации тепловой энергии наибольшая.

Для БГУ, работающих на кукурузе, установлено, что из общего объема ископаемой энергии "на входе" наибольшая доля (до 70 %) тратится собственно на выращивание кукурузы. Еще часть ископаемой энергии (до 30 %) расходуется на транспортировку биомассы к месту хранения (силосные кагаты) и загрузку в биореактор (принятое в исследовании среднее расстояние перевозки – 20 км). Собственные нужды биогазовых установок (электроэнергия на привод мешалок, насосов и т.д., а также тепловая энергия для обогрева биореакторов) обычно в полной мере обеспечиваются за счет части энергии производимого биогаза (до 15...25 %). Эта информация может быть полезной при оптимизации энергозатрат «на входе» БГУ для обеспечения более высокого коэффициента выхода энергии.

Табл. 1. Характеристики исследуемых вариантов производства электроэнергии из биогаза [1]

Показатели	Вариант I (район Göttingen)	Вариант II (район Celle)	Вариант III (район Hildesheim)
Потребление ископаемых топлив на выращивание кукурузы, кг у.т./т силоса	5,8	8,2	6,2
Потребление э/э на собственные нужды БГУ, % произведенной э/э	7 %	7 %	7 %
Потребление тепловой энергии на собственные нужды БГУ, кВт·час/м <sup>3</sup> биогаза	0,256	0,256	0,256
Доля полезно утилизированной тепловой энергии	60 %	30 %	40 %
$EUC_{NR}^*$	2,2	1,84	2,1

\* Пересчет авторов по данным работы [1].

Табл. 2. Характеристики биогазовых установок, работающих на разных видах сырья [2]

Вид сырья	Содержание сухого вещества, %	Выход БГ ГДж/сух. т	Затраты энергии «на входе», ГДж/сух. т			$EUC_{NR}$
			Подготовка сырья	Транспортировка сырья (15 км)	Доставка сброженного остатка на поля	
Коровий навоз	8	6,2	0	0,19	0,15	2,6
Свиной навоз	8	7	0	0,19	0,15	3,0
Жировые осадки	4	22	0	1,2	0,24	6,2
Энергетические культуры	23	10,6	1,9	0,07	0,24	2,4
Органическая часть ТБО	30	12,4	0,8	0,24	0,24	3,6
Отходы скотобойни	17	9,4	0	0,14	0,24	3,6
Ботва сахарной свеклы	19	10,6	0,54	0,09	0,24	3,5
Солома	82	7,1	0,28	0,05	0,24	2,7

Можно ожидать, что для биогазовых установок  $EUC_{NR}$  будет выше 2 для случаев использования в качестве сырья большей доли отходов сельского хозяйства или других видов отходов. Этот вывод подтверждается данными исследования [2], где была рассмотрена энергетическая эффективность БГУ, работающих на разных видах сырья для условий Швеции. Наилучший результат ( $EUC_{NR} = 6,2$ ) получен для случая производства биогаза из жировых осад-

ков (таблица 2). Этому виду сырья соответствует наивысший удельный выход биогаза – 22 ГДж/сух. т и нулевые затраты на подготовку биомассы. Самый низкий коэффициент выхода энергии (2,4) приходится на энергетические культуры как сырье для получения биогаза. Этот вариант имеет наибольшие затраты энергии на подготовку сырья, поскольку включает этап выращивания культур, и средний выход биогаза – 10,6 ГДж/сух. т.

**Энергетическая эффективность производства биоэтанола и биодизеля**

Обычно много споров вызывает вопрос целесообразности производства биотоплив первого поколения, в частности биоэтанола. Рассмотрим несколько весомых исследований, посвященных этому вопросу.

В работе [3] оценено энергетическую эффективность различных технологий производства биоэтанола (для условий Франции). Проанализировано три случая: I – производство биоэтанола из сахарной свеклы с побочным продуктом – бардой, II – производство биоэтанола из сахарной свеклы с сахаром как «побочным» продуктом, III – производство биоэтанола из зерна пшеницы с побочным продуктом – сухой дробинкой с растворимыми веществами. Для каждого случая были рассмотрены несколько вариантов распределения затраченной энергии (т.е. энергии «на входе») между основным и побочными продуктами производства: по их массе, по содержанию энергии, по рыночной стоимости, по энергии, необходимой для производства заменителя по-

бочного продукта (энергия «замещения»). На сегодня не существует единого мнения специалистов относительно того, какой метод распределения энергозатрат является наилучшим. Но чаще всего применяют метод распределения по массе конечных продуктов.

Результаты расчета показывают, что коэффициент выхода энергии  $EYC_{NR}$  существенно отличается для различных технологий получения биоэтанола и зависит также от способа распределения «входящих» энергозатрат по конечным продуктам (таблица 3).

При производстве биотоплива из сахарной свеклы для всех рассмотренных вариантов  $EYC_{NR} < 2$ , а при методах распределения энергозатрат не по массе конечных продуктов – даже  $< 1$ . Это свидетельствует об *очень низкой энергетической эффективности получения биоэтанола или вообще об ее отсутствии*. Единственный положительный результат дает вариант производства биотоплива из пшеницы с распределением «входящих» энергозатрат по массе конечных продуктов – биоэтанола и сухой дробинки. В этом случае коэффи-

Табл. 3. Энергетическая эффективность технологий производства биоэтанола [3]

Метод распределения энергозатрат по конечным продуктам	Биоэтанол из сахарной свеклы**			Биоэтанол из пшеницы
	Вариант I	Вариант 50 % I / 50 % II	Вариант II	Вариант III
	$EYC_{NR}$	$EYC_{NR}$	$EYC_{NR}$	$EYC_{NR}$
Без распределения – все отнесено на биоэтанол	1,42	0,54	0,33	0,83
По массе*	1,59	1,28	1,02	2,23
По содержанию энергии	1,51	1,13	0,89	1,52
По рыночной стоимости	1,47	1,22	0,98	1,77
По энергии, необходимой для производства заменителя побочного продукта	1,48	1,12	0,88	0,96

\* Наиболее распространённый вариант распределения энергозатрат.

\*\* Варианты производства биоэтанола: I – из сахарной свеклы с бардой как побочным продуктом, II – из сахарной свеклы с сахаром как «побочным» продуктом, III – из зерна пшеницы с сухой дробинкой с растворимыми веществами как побочным продуктом.

коэффициент выхода энергии  $EYC_{NR} > 2$ , что удовлетворяет минимальным требованиям по энергетической эффективности биоэнергетических технологий.

Представляет значительный интерес исследование [4], в котором проведен детальный анализ полной энергоемкости производства биоэтанола и биодизеля по существующим технологиям для условий Украины. Рассмотрены варианты получения биоэтанола из озимой пшеницы, ярового ячменя и сахарной свеклы. Результаты оценки показывают, что при использовании технологии вакуумной ректификации, энергозатраты на производство биоэтанола из всех рассмотренных видов сырья практически равны энергосодержанию полученного биотоплива ( $EYC_{NR} \approx 1$ ) (табл. 4). При использовании же технологии атмосферной ректификации, затраты энергии на производство биоэтанола превышают его энергосодержание ( $EYC_{NR} < 1$ ).

Таким образом, авторы [4] делают вывод, что данное направление получения биотоплива нельзя считать энергетически целесообразным. Оно может иметь только локальное значение в случае, когда сырье для производства биоэтанола является отходом, подлежащим утилизации или уничтожению. Или другими словами, когда затраты энергии на транспортировку и подготовку сырья незначительны и не превышают 4...5 МДж/л.

Относительно биодизельного топлива в исследовании [4] рассматривается случай его производства из рапсового масла путем перэтерификации масла метиловым спиртом. Оценено, что полная энергоемкость производства биотоплива составляет 23,5...29,3 МДж/кг. Исходя из энергетической емкости биодизеля 40 МДж/кг, эти показатели соответствуют коэффициенту выхода энергии  $EYC_{NR} = 1,36...1,70$ . Авторы [4] отмечают, что с учетом энергетического эквивалента факторов, вызванных физическим трудом людей, амортизацией оборудования и сооружений, финансовыми и другими затратами, полная энергоемкость производства биодизеля из рапсового масла составит 40...50 МДж/кг ( $EYC_{NR} = 0,8...1,0$ ). Это означает, что производство биодизеля также является нецелесообразным с энергетической точки зрения.

#### Экологический анализ

Снижение выбросов парниковых газов является одним из наиболее весомых показателей при оценке влияния биоэнергетических технологий на окружающую среду. И хотя биомасса считается  $CO_2$ -нейтральным топливом, при операциях ее заготовки, складирования, транспортировки, предварительной обработки и использования происходит потребление энергии ископаемого топлива, что в свою очередь приводит к выбросам парниковых газов. Основными парниковыми газами, выбро-

Табл. 4. Энергетические показатели технологий производства биоэтанола [4]

Сырье	Полные энергозатраты*, МДж/л		Коэффициент выхода энергии $EYC_{NR}$	
	Атмосферная ректификация $CED 1$	Вакуумная ректификация $CED 2$	Атмосферная ректификация $Q_{BE} / CED 1$	Вакуумная ректификация $Q_{BE} / CED 2$
Озимая пшеница	28,58	22,88	0,8	1,0
Ярый ячмень	25,58	19,88	0,9	1,1
Кукуруза	27,39	21,69	0,8	1,0
Сахарная свекла	29,7	24,3	0,8	0,9

\* Учены все технологические (физические) затраты. Не учтены энергозатраты, связанные с работой людей, амортизацией оборудования и т.п.

сы которых имеют место при работе энергетических систем являются диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>) и закись азота (N<sub>2</sub>O). Величина выбросов всех парниковых газов приводится к эквивалентному показателю выбросов CO<sub>2</sub> через соответствующие коэффициенты.

Ниже рассмотрим величину сокращения выбросов парниковых газов для различных биоэнергетических технологий по сравнению с установками на ископаемых топливах, и соответствует ли она требованиям Директивы 2009/28/ЕС [6]. Напомним, что согласно этой Директиве, снижение выбросов парниковых газов при внедрении технологий возобновляемой энергетики должно быть не менее 35 % по сравнению с аналогичным использованием ископаемых топлив. С 01.01.2017 минималь-

ное требование увеличивается до 50 %, а с 01.01.2018 – до 60 % для установок, введенных в эксплуатацию с 01.01.2017.

В таблице 5 представлены результаты исследования [7], проведенного в рамках Задачи 38 Международного Энергетического Агентства, собственные результаты авторов и данные по типичным выбросам парниковых газов при производстве биотоплив согласно Директиве 2009/28/ЕС.

Из данных таблицы видно, что все установки на твердой биомассе и большинство установок на биогазе соответствуют текущим и будущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС – сокращение выбросов парниковых газов, обусловленное их работой, составляет > 60 %.

Что касается жидких моторных биотоплив,

Табл. 5. Удельные выбросы парниковых газов для различных технологий производства энергии из биомассы

Виды технологий	Удельные выбросы ПГ	Сокращение выбросов ПГ	
	г CO <sub>2-экв</sub> /кВт·ч <sub>Т</sub>	г CO <sub>2-экв</sub> /кВт·ч <sub>Т</sub>	%
<i>Производство тепловой энергии</i>			
Котел на отходах древесины (150 кВт <sub>Т</sub> ) [7]	52	327	86 % <sup>1)</sup>
Котел на мискантусе (70 кВт <sub>Т</sub> ) [7]	101	295	75 % <sup>1)</sup>
Котел на древесной щепе (500 кВт) <sup>4)</sup>	39	185	83 %
Котел на древесной щепе из энергетической вербы (300 кВт) <sup>4)</sup>	39	185	83 %
Котел на тюках соломы (500 кВт) <sup>4)</sup>	14	211	94 %
Котел на гранулах из древесины (100 кВт) <sup>4)</sup>	33	194	85 %
Котел на гранулах из соломы (100 кВт) <sup>4)</sup>	60	165	72 %
<i>Производство электроэнергии</i>			
ТЭС на древесной щепе (2 МВт <sub>э</sub> ) <sup>4)</sup>	213	909	81 %
ТЭС на тюках соломы (2 МВт <sub>э</sub> ) <sup>4)</sup>	217	905	80 %
ТЭС на тюках соломы (25 МВт <sub>э</sub> ) [8] <sup>9)</sup>	178 <sup>10)</sup>	нет данных	65 %
ТЭС на отходах древесины (30 МВт <sub>э</sub> ) [7]	71	950	93 % <sup>2)</sup>
ТЭС 500 МВт <sub>э</sub> ; совместное сжигание отходов древесины с углем [7]	128	881	87 % <sup>2)</sup>

<i>Совместное производство тепловой и электрической энергии</i>	г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /кВт·ч <sub>об.</sub>	г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /кВт·ч <sub>об.</sub>	%
БГУ с совместным сбраживанием навоза и силоса кукурузы (годовое производство э/э 4 ГВт·ч, тепловой энергии 7,2 ГВт·ч) [7]	266	207	56 % <sup>3)</sup>
ТЭЦ на древесной щепе (2 МВт <sub>э</sub> +10 МВт <sub>т</sub> ) <sup>4)</sup>	35	152	81 %
ТЭЦ на тюках соломы (2 МВт <sub>э</sub> +10 МВт <sub>т</sub> ) <sup>4)</sup>	37	150	80 %
<i>Моторные биотоплива [1]<sup>5)</sup></i>			
Биогаз из навоза <sup>8)</sup>	12...13		84...86 %
Биогаз с полигонов ТБО <sup>8)</sup>	17		80 %
<i>Биотоплива I поколения</i>			
Биоэтанол из сахарной свеклы	33		61 %
Биоэтанол из пшеницы	57		32 %
Биоэтанол из кукурузы	37		56 %
Биодизель из рапса	46		45 %
Биодизель из рапса [7]	111 г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /км	80 г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /км	58 % <sup>6)</sup>
	157 г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /км	34 г CO <sub>2-ЭКВ</sub> /км	18 % <sup>7)</sup>
Биодизель из подсолнечника	35		58 %
Биодизель из сои	50		40 %
<i>Биотоплива II поколения</i>			
Биоэтанол из соломы пшеницы	11		87 %
Биоэтанол из древесных отходов	17		80 %
Биодизель ФТ	4...6		93...95 %

1) По сравнению с мазутным котлом.

2) По сравнению с угольной электростанцией.

3) По сравнению с газовой ТЭЦ.

4) Результаты авторов для условий Украины (расстояние транспортировки биомассы – 50 км). Сравнение с вариантом сжигания природного газа.

5) Типичные значения согласно Приложению 5 Директивы 2009/28/ЕС [6].

6) Побочный продукт глицерин используется в качестве материала в пищевой или фармацевтической промышленности.

7) Побочный продукт глицерин используется как топливо.

8) В виде сжатого метана.

9) Данные для случая урожайности зерновых культур порядка 7 сух. т/га. Сравнение с вариантом сжигания природного газа.

10) Пересчет авторов по данным соответствующей работы.

то большинство показателей биодизеля и биоэтанола первого поколения удовлетворяют текущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС, некоторые удовлетворяют требованию, которое вступит в силу с 2017 года (мин. 50 %), и практически все показатели выходят за пределы требования, которое будет применяться с 2018 года (мин. 60 %). Для биотоплив второго поколения результаты намного лучше – сокращение эмиссии парниковых газов составляет 80...95 %. Хорошие показатели имеет также биогаз как моторное топливо – более 80 %.

Эти результаты хорошо согласуются с данными других авторов, собранными и представленными в исследовании [7]. При производстве энергии из биомассы снижение выбросов парниковых газов составляет 70...90 % по сравнению с энергоустановками на ископаемых топливах. При применении моторных биотоплив первого поколения сокращение эмиссии ПГ незначительное. Наилучшие показатели имеют биоэтанол и биодизель второго поколения – для них уменьшение выбросов ПГ может достигать более 90 %. Достаточно хороший показатель соответствует также случаю применения биогаза в качестве моторного топлива – в среднем около 65 %.

#### ***Влияние расстояния транспортировки на энергетические и экологические показатели биоэнергетических технологий***

Как было отмечено ранее, одним из параметров, существенно влияющих на энергетическую эффективность внедрения биоэнергетических технологий, является расстояние транспортировки биомассы к месту ее обработки, конечного потребления и т.п.

Согласно данным работы [5], для сохранения энергетической эффективности биоэнергетической установки на минимально необходимом уровне ( $EYC_{NR} > 2$ ) древесную щепу можно перевозить на расстояние до 200...300 км, а древесные гранулы практически не имеют ограничения по расстоянию транспортировки. Если же энергоустановка на гранулах должна соответствовать критерию высокой энергетической эффективности ( $EYC_{NR} > 5$ ), то рас-

стояние перевозки ограничивается радиусом порядка 1200 км.

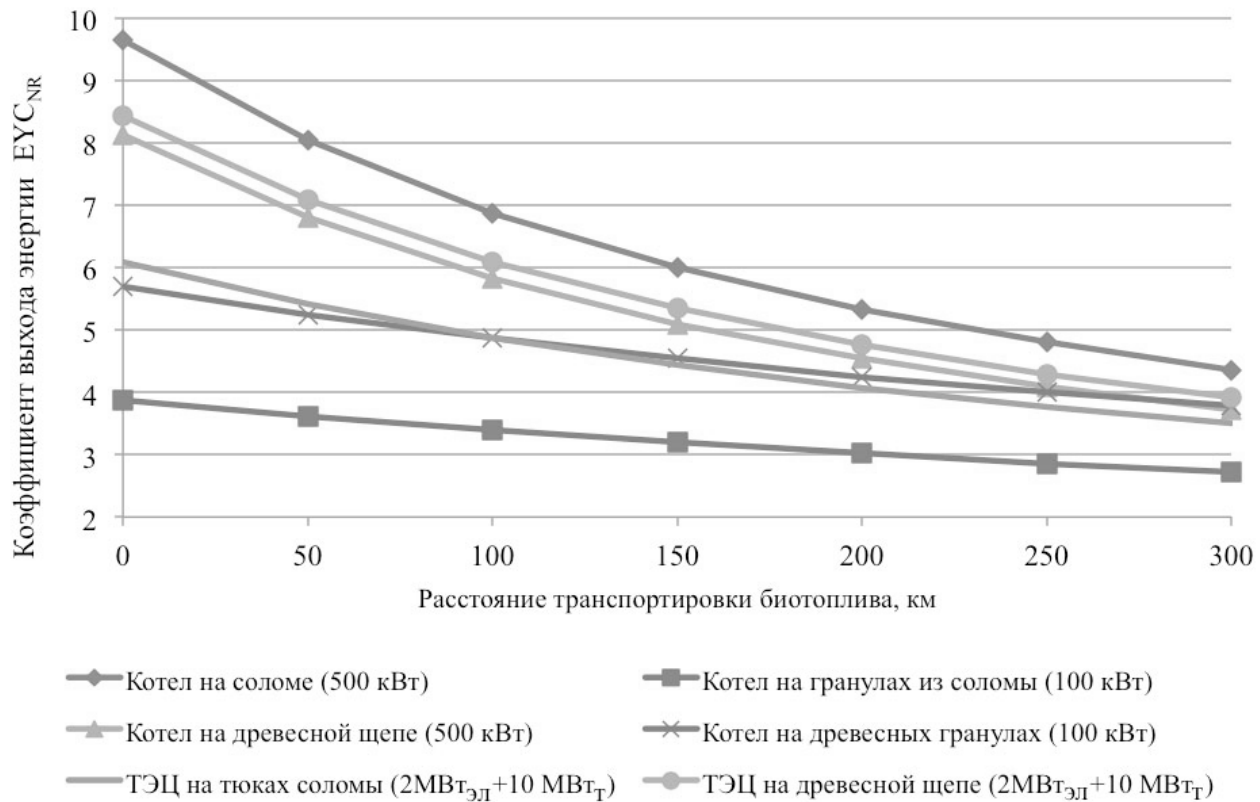
Для получения более детальной информации авторы исследовали влияние расстояния транспортировки биомассы/биотоплива на коэффициент выхода энергии  $EYC_{NR}$  для условий Украины. Результаты расчетов для типичных установок показали, что тюкованную солому, древесную щепу и гранулы из биомассы можно перевозить на расстояние до 300 км с сохранением достаточно высокого коэффициент выхода энергии ( $EYC_{NR} > 2$ ) (рис. 1).

Предельные значения расстояния перевозки, соответствующие  $EYC_{NR} = 1$ ,  $EYC_{NR} = 2$  и  $EYC_{NR} = 5$ , представлены в таблице 6. Если коэффициент выхода энергии равен 1, это означает, что расходы (невозобновляемой) энергии, необходимые для создания и обеспечения работы биоэнергетической установки, эквивалентны энергии, полученной «на выходе».  $EYC_{NR} = 2$  соответствует минимально допустимой энергетической эффективности работы установки, а  $EYC_{NR} = 5$  и больше соответствует наиболее рекомендуемым значениям (по данным работы [5]).

Для варианта работы биоэнергетической установки (кроме ТЭС) на уровне энергоэффективности не ниже минимально рекомендованного ( $EYC_{NR} > 2$ ) расстояние перевозки биотоплива может быть довольно большим – 500...1000 км в зависимости от вида биотоплива и типа установки. Если же необходимо обеспечить более высокий уровень энергоэффективности ( $EYC_{NR} > 5$ ), то расстояние транспортировки следует ограничить до 100...200 км, а в некоторых случаях – и до минимального значения. Следует отметить, что сделанные выводы носят общий характер, а в каждом конкретном случае необходимо выполнять детальные расчеты с тщательным учетом местных особенностей.

#### ***Выводы***

Внедрение технологий производства энергии из биомассы предлагает широкие возможности для замещения ископаемых топлив. Определение целесообразности и приоритет-



**Рис. 1. Зависимость коэффициента выхода энергии от расстояния транспортировки биотоплива.**

ности внедрения определенных технологий в конкретных условиях может основываться на результатах расчета энергетического баланса и баланса парниковых газов – основных элементов оценки жизненного цикла технологий.

Энергетическая эффективность работы биогазовых установок зависит от вида сырья, применяемой технологии и других условий. Согласно литературным данным, для БГУ коэффициент выхода энергии может колебаться от 1,8 до > 6.

Ситуация с производством моторных биотоплив (биодизеля и биоэтанола) неоднозначная. По большинству имеющихся данных коэффициент выхода энергии для них существенно ниже 2, тогда как некоторые авторы показывают  $EUC_{NR} > 2$ . Представляется, что положительного с энергетической точки зрения результата можно достичь лишь в отдельных случаях при определенных условиях, например, при использовании сырья в виде отходов, подлежащих утилизации.

По вопросу экологической эффективности биоэнергетических технологий можно отметить, что все установки на твердой биомассе и большинство установок на биогазе соответствуют текущим и будущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС – сокращение выбросов парниковых газов, обусловленное их работой, составляет > 60 %.

Что касается жидких моторных биотоплив, то большинство показателей биодизеля и биоэтанола первого поколения удовлетворяют текущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС, некоторые удовлетворяют требованию, которое вступит в силу с 2017 года (мин. 50 %), и практически все показатели выходят за пределы требования, которые будут применяться с 2018 года (мин. 60 %). Для биотоплива второго поколения результаты намного лучше – сокращение эмиссии парниковых газов составляет 80...95 %. Хорошие показатели имеет также биогаз как моторное топливо – более 80 %.

Табл. 6. Максимально целесообразное расстояние транспортировки биотоплив автотранспортом

Тип энергетической установки	Предельное расстояние транспортировки, км		
	$EYC_{NR} = 1$ энергия «на входе» равна энергии «на выходе»	$EYC_{NR} = 2$ минимально допустимое значение	$EYC_{NR} = 5$ рекомендуемое значение
Котел на древесной щепе (500 кВт)	1800	800	170
Котел на древесной щепе из энергетической вербы (300 кВт)	2100	900	120
Котел на гранулах из древесины (100 кВт)	2800	1100	80
ТЭЦ на древесной щепе (2 МВт <sub>эл</sub> +10 МВт <sub>т</sub> )	1900	850	170
ТЭС на древесной щепе (2 МВт <sub>э</sub> )	250	0	-*
Котел на соломе (500 кВт)	1800	800	200
Котел на гранулах из соломы (100 кВт)	1800	500	-*
ТЭЦ на тюках соломы (2 МВт <sub>э</sub> +10 МВт <sub>т</sub> )	1500	800	80
ТЭС на тюках соломы (2 МВт <sub>э</sub> )	150	-**	-*

\* Даже при нулевом расстоянии перевозки биотоплива  $EYC_{NR} < 5$ .

\*\* Даже при нулевом расстоянии перевозки биотоплива  $EYC_{NR} < 2$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Daniela Dressler, Achim Loewen, Michael Nelles. Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production // The International Journal of Life Cycle Assessment. – November 2012, vol. 17, issue 9, P. 1104 – 1115.

2. M. Berglund, P. Börjesson. Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687 – 690.

3. J. Malca, F. Freire. Life cycle energy analysis for bioethanol: allocation methods and implications for energy efficiency and renewability. Proceedings of 17th International Conference on Efficiency, costs optimization simulation and environmental impact of energy and process systems, 7-9 July 2004, Mexico.

4. Белодед В.Д., Тарасенко П.В. Некоторые расчеты относительно энергетической эффективности биотоплив // Проблемы общей энер-

гетики. – 2008, №18, С. 34 – 39.

5. Thomas Nussbaumer, Michael Oser. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004.

6. Директива 2009/28/ЕС относительно стимулирования использования энергии из возобновляемых источников, внесения изменений и дальнейшего изменения Директив 2001/77/ЕС и 2003/30/ЕС.

7. Neil Bird, Annette Cowie, Francesco Cherubini, Gerfried Jungmeier. Using a Life Cycle Assessment approach to estimate the net greenhouse gas emissions of bioenergy. Report on IEA Bioenergy Task 38.

8. C.M. Sastre, E. Maletta, Y. Gonzalez-Arechavala et al. Centralised electricity production from winter cereals biomass grown under central-northern Spain conditions: Global warming and energy yield assessment // Applied Energy, – February 2014, vol. 114, P. 737 – 748.

**ENERGY AND ECOLOGY ANALYSIS  
OF BIOENERGY TECHNOLOGIES. PART 2**

**Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I.**

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

The paper covers the issue of energy efficiency of biogas production and production of first generation liquid biofuels. Detailed analysis of studies on energy and ecology efficiency of bioenergy technologies based on the life cycle assessment is performed. The results of GHG emissions calculations show that all solid biomass installations and most of biogas plants meet current and future requirements of the Directive 2009/28/EC – greenhouse gas emissions reduction caused by their operation is > 60 %. As for liquid biofuels, most parameters of the first generation biodiesel and bioethanol meet current requirements of the Directive 2009/28/EC, some meet the requirement that enters into force from 2017 (min. 50 %), and almost all parameters exceed the requirements that will be applied from 2018 (min. 60 %). For the second generation biofuels results are much better, greenhouse gas emissions reduction amounts to 80...95 %. Biogas as transport fuel also has quite good figures on GHG emission reduction, which are over 80 %.

References 8, Tabl. 6, Fig 1.

**Key words:** biomass, biogas, biofuel, bioenergy technologies, energy analysis, energy yield coefficient, life cycle assessment, greenhouse gases.

1. *Daniela Dressler, Achim Loewen, Michael Nelles.* Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production // *The International Journal of*

*Life Cycle Assessment.* – November 2012, vol. 17, issue 9, P. 1104 – 1115.

2. *M. Berglund, P. Börjesson.* Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687 – 690.

3. *J. Malca, F. Freire.* Life cycle energy analysis for bioethanol: allocation methods and implications for energy efficiency and renewability. Proceedings of 17th International Conference on Efficiency, costs optimization simulation and environmental impact of energy and process systems, 7-9 July 2004, Mexico.

4. *Bilodid V.D., Tarasenko P.V.* Some calculations on the energy efficiency of biofuels // *Problems of General Energy.* – 2008, №18, P. 34 – 39. (Rus.)

5. *Thomas Nussbaumer, Michael Oser.* Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004.

6. *Directive 2009/28/EC* of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

7. *Neil Bird, Annette Cowie, Francesco Cherubini, Gerfried Jungmeier.* Using a Life Cycle Assessment approach to estimate the net greenhouse gas emissions of bioenergy. Report on IEA Bioenergy Task 38.

8. *C.M. Sastre, E. Maletta, Y. Gonzalez-Arechavala et al.* Centralised electricity production from winter cereals biomass grown under central-northern Spain conditions: Global warming and energy yield assessment // *Applied Energy,* – February 2014, vol. 114, P. 737 – 748.

*Получено 21.05.2014*

*Received 21.05.2014*

УДК 662.61:621

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОПОТРЕБЛЯЮЩИХ КОТЛОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ**

**Прокопов В.Г.**

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

Наведено результати оцінки енергетичної ефективності будівель за умови застосування комбінованих систем теплоснабження з традиційним водяним опаленням та електричним опаленням прямої дії. Визначено оптимальні величини частки теплових втрат будівель, яка компенсується за рахунок електронагріву.

Приведены результаты оценки энергетической эффективности зданий при условии применения комбинированных систем теплоснабжения с традиционным водяным отоплением и электрическим отоплением прямого действия. Определены оптимальные величины доли тепловых потерь зданий, которая компенсируется за счет электронагрева.

The evaluation results of the energy efficiency of buildings, provided the use of combined heating systems with traditional water heating and direct action electric heating are submitted. Optimal quantities of heat loss share of buildings, which is compensated by electrical heating, are determined.

Библ. 7, рис. 4.

**Ключевые слова:** комбинированные системы теплоснабжения зданий, тепловые потери, эффективность.

$F$  – отапливаемая площадь здания,  $m^2$ ;  
 $K_{\text{топ}}$  – коэффициент приведенных затрат энергии топлива;  
 $q_{\text{эо}}$  – среднегодовые удельные затраты тепловой энергии для систем теплоснабжения, полученной преобразованием электрической энергии,  $kWh \cdot ch / (m^2 \cdot год)$ ;

$V_{\text{г}}$  – объем годового потребления природного газа,  $m^3/год$ ;  
 $\beta$  – доля теплотерь здания, компенсируемых электронагревом.

**Индекс:**  
 опт – оптимальный.

Одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности зданий является широкое применение комбинированных систем теплоснабжения, базирующихся на совместном использовании традиционных энергоресурсов и электроэнергии [1-3]. Настоящая работа посвящена исследованию энергетической эффективности зданий в условиях применения комбинированных систем теплоснабжения, в которых наряду с традиционным водяным отоплением используется электрическое отопление прямого действия. При этом особое внимание уделяется сопоставлению эффективности таких систем при различной доле теплотерь  $\beta$ , компенсируемых электронагревом. Проводится сравнительный анализ энергетической эффективности указанных инженерных систем и

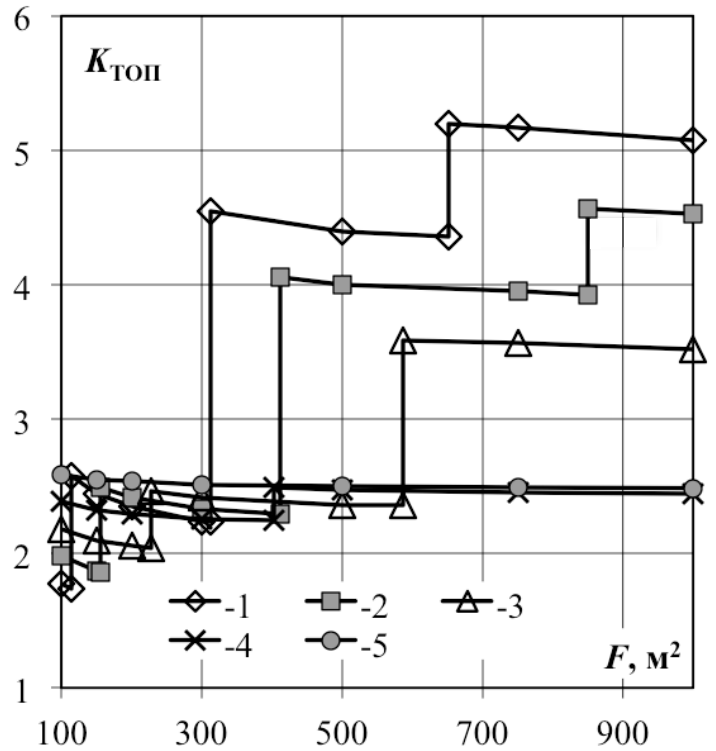
водяной системы теплоснабжения с газопотребляющим и электрическим котлами. Приводятся также результаты исследований по определению оптимального значения  $\beta$  для рассматриваемой системы комбинированного теплоснабжения.

В работе оценка энергетической эффективности систем теплоснабжения проводится на основе методики, изложенной в [4]. В данной методике в качестве критерия энергетической эффективности зданий применяется коэффициент приведенных затрат энергии топлива  $K_{\text{топ}}$ . При этом указанный коэффициент определяется с учетом следующих факторов: во-первых, дифференциации цен на природный газ в зависимости от объемов его годового потребления и, во-вторых, двух- и трехзонных тарифов на элек-

троэнергию, дифференцированных по времени суток [5,6]. Следует особо отметить, что в соотношении для определения  $K_{\text{ТОП}}$  цены на природный газ и электроэнергию вообще не фигурируют. В нем принимаются во внимание лишь так называемые зонные коэффициенты, при умножении которых на установленный рыночный тариф определяется соответствующая ставка тарифа на электроэнергию и природный газ. Это позволяет интерпретировать наличие указанной дифференциации цен на электроэнергию и природный газ как изменение расхода первичной энергии, отвечающее различным тарифным ставкам.

Характерные результаты, выполненные на основе указанной методики исследований, представлены на рис. 1-4. Рис. 1 иллюстрирует зависимость  $K_{\text{ТОП}} = f(F)$  при различных значениях параметра  $\beta$  для рассматриваемой комбинированной системы с газопотребляющим котлом и электроотоплением прямого действия применительно ко второй (высокотемпературной) зоне Украины [7]. Согласно приведенным данным, с ростом  $\beta$  уменьшается число скачкообразных изменений функции  $K_{\text{ТОП}}$ . Так, их количество равно трем при  $\beta = 0,25$ , двум – при  $\beta = 0,5$  и одному – при  $\beta = 0,75$ . Причем при увеличении  $\beta$  местоположение указанных скачкообразных изменений смещается в область больших значений  $F$ . Отмеченное смещение обусловлено уменьшением общего годового расхода газа ввиду увеличения электрической составляющей в комбинированной системе теплоснабжения, так что граничные значения расхода газа, отвечающие его различным тарифам, достигаются при больших величинах отапливаемой площади.

Как свидетельствуют приведенные на рис. 1 данные, в условиях относительно малых площадей здания наиболее эффективным является применение водяных систем отопления с газопотребляющими котлами, а также рассматриваемой комбинированной системы при небольших величинах  $\beta$ . По мере возрастания отапливаемой площади для обеспечения высокой энергетической эффективности здания необходимо соответствующее увеличение параметра  $\beta$ , т.е. повышение доли электрической состав-



**Рис. 1. Зависимость коэффициента приведенных затрат энергии топлива  $K_{\text{ТОП}}$  от величины отапливаемой площади  $F$  зданий, расположенных во второй температурной зоне Украины, для комбинированной системы отопления – водяной с газопотребляющим котлом и электрической прямого действия при различной доле теплопотерь  $\beta$ , покрываемых за счет электроэнергии: 1 –  $\beta = 0$ ; 2 –  $0,25$ ; 3 –  $0,5$ ; 4 –  $0,75$ ; 5 – 1.**

ляющей в комбинированной системе теплоснабжения.

Сопоставление зависимостей  $K_{\text{ТОП}} = f(F)$  для рассматриваемой комбинированной инженерной системы и системы с газопотребляющим и электрическим котлами свидетельствует о следующем. Характер указанных зависимостей для двух сравниваемых комбинированных систем теплоснабжения оказывается весьма сходным. При этом, однако, имеют место некоторые количественные расхождения в значениях  $K_{\text{ТОП}}$ .

А именно, в случае комбинированной инженерной системы с прямым электронагревом величины  $K_{\text{ТОП}}$  являются несколько меньшими во

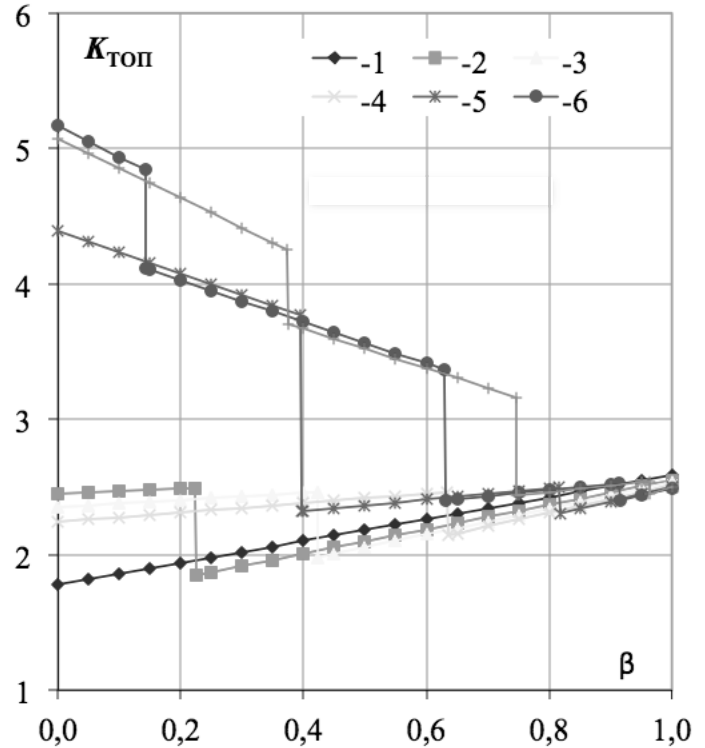
всем рассматриваемом диапазоне изменения отапливаемой площади  $F$ , что обусловлено следующими обстоятельствами. Как уже отмечалось, в случае систем прямого действия, во-первых, удельные затраты  $q_{\text{Э0}}$  оказываются меньшими, чем при использовании электродотла, главным образом, ввиду отсутствия трубопроводов, являющихся одним из факторов теплопотерь. И во-вторых, системы прямого действия характеризуются более высокой эффективностью регулирования температуры помещений и соответственно пониженными энергетическими затратами на данное регулирование.

Оптимальные значения параметра  $\beta_{\text{ОПТ}}$  определялись из полученных расчетных зависимостей  $K_{\text{ТОП}} = f(\beta)$  при фиксированных величинах отапливаемой площади (рис. 2). Эти значения  $\beta$  отвечают наименьшему значению  $K_{\text{ТОП}}$ , т.е. наибольшей энергетической эффективности здания. Найденные оптимальные значения  $\beta_{\text{ОПТ}}$  и соответствующие им значения  $K_{\text{ТОП}}^{\text{ОПТ}}$  для различных величин отапливаемой площади  $F$  иллюстрируют данные на рис. 3.

Как видно, с ростом  $F$  доля электронагрева  $\beta$  в компенсации теплопотерь здания увеличивается от 0,225 при  $F = 150 \text{ м}^2$  до 0,92 при  $F = 750 \text{ м}^2$ . Далее наблюдается резкое падение величины  $\beta_{\text{ОПТ}}$ , обусловленное изменением годового объема потребления природного газа с  $V_{\text{Г}} = 2500 \text{ м}^3/\text{год}$  на  $V_{\text{Г}} = 6000 \text{ м}^3/\text{год}$ . При этом параметр  $\beta_{\text{ОПТ}}$  принимает значение 0,63 и с дальнейшим увеличением отапливаемой площади растет до  $\beta_{\text{ОПТ}} = 0,75$  при  $F = 1000 \text{ м}^2$ .

Что касается оптимальных значений  $K_{\text{ТОП}}^{\text{ОПТ}}$  то как следует из данных на рис. 3, величина  $K_{\text{ТОП}}^{\text{ОПТ}}$  монотонно возрастает от 1,85 до 2,44 с изменением отапливаемой площади от 150 до 1000  $\text{м}^2$ . То есть в целом энергетическая эффективность рассматриваемой комбинированной системы падает по мере увеличения отапливаемой площади здания.

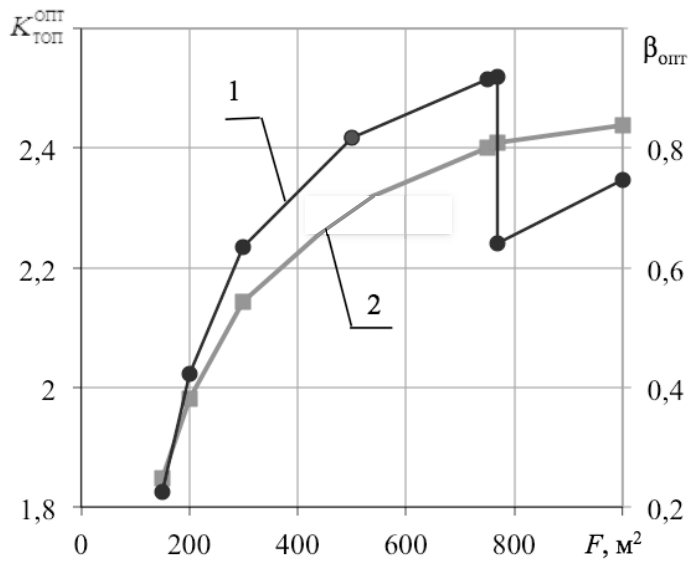
Остановимся вкратце на сопоставлении данных, отвечающих разным температурным зонам Украины. Из сравнения результатов расчетных исследований следует, что в случае первой (низкотемпературной) зоны положения скачков функции  $K_{\text{ТОП}}^{\text{ОПТ}} = f(F)$  смещаются в об-



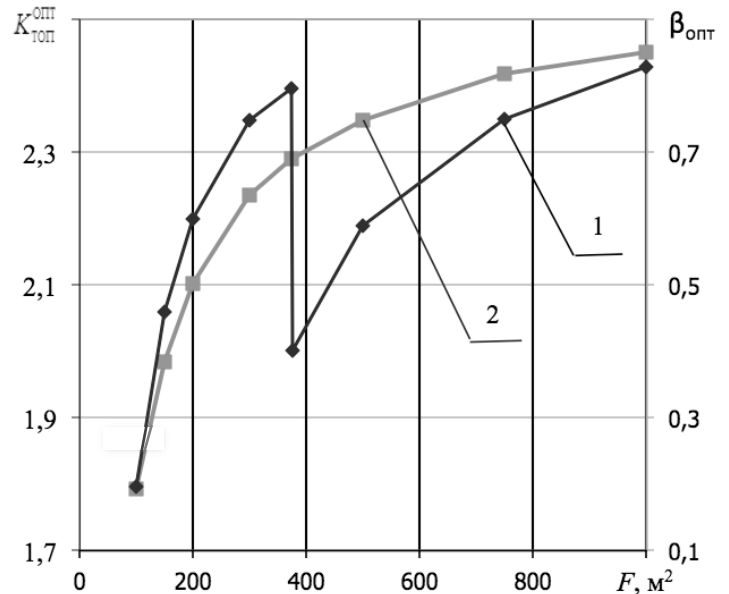
**Рис. 2. Зависимость коэффициента приведенных затрат энергии топлива  $K_{\text{ТОП}}$  от доли теплопотерь  $\beta$  в компенсации теплопотерь зданий, расположенных во второй температурной зоне Украины, для комбинированной системы отопления – водяной с газопотребляющим котлом и электрической прямого действия при различных величинах отапливаемой площади  $F$ : 1 –  $F=100 \text{ м}^2$ ; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 500; 6 – 750; 7 – 1000.**

ласть меньших значений отапливаемой площади. При этом уровень величины  $K_{\text{ТОП}}^{\text{ОПТ}}$  на сходственных отрезках монотонного изменения функции оказывается несколько ниже.

Для разных температурных зон Украины зависимости  $\beta_{\text{ОПТ}} = f(F)$  хотя и являются качественно сходными, существенно отличаются в количественном отношении. Так, в случае низкотемпературной зоны на участке, отвечающем относительно небольшим отапливаемым площадям до скачкообразного изменения  $\beta$ , значения  $\beta_{\text{ОПТ}}$  заметно превышают соответствующие значения для высокотемпературной зоны. Например, при  $F = 200 \text{ м}^2$   $\beta_{\text{ОПТ}} = 0,42$  и 0,6 соответственно для высоко-



**Рис. 3.** Оптимальные значения доли теплопотерь  $\beta_{\text{опт}}$ , покрываемых за счет электроэнергии (1), и соответствующие значения  $K_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  (2) для различных величин отапливаемой площади  $F$  зданий, расположенных во второй температурной зоне Украины, при использовании комбинированной системы отопления – водяной с газопотребляющим котлом и электрической прямого действия.



**Рис. 4.** Оптимальные значения доли теплопотерь  $\beta_{\text{опт}}$ , покрываемых за счет электроэнергии (1), и соответствующие значения  $K_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  (2) для различных величин отапливаемой площади  $F$  зданий, расположенных в первой температурной зоне Украины, при использовании комбинированной системы отопления – водяной с газопотребляющим котлом и электрической прямого действия.

и низкотемпературной зоны Украины. Обращает на себя внимание также тот факт, что положение скачка функции  $\beta_{\text{опт}} = f(F)$  в условиях низкотемпературной зоны существенно смещается в область меньших значений отапливаемой площади. В рассматриваемой ситуации положение указанного скачка смещается от  $F = 750$  м<sup>2</sup> для высокотемпературной зоны до  $F = 380$  м<sup>2</sup> для низкотемпературной зоны.

Что же касается собственно величины скачка функции  $\beta_{\text{опт}} = f(F)$ , то она возрастает от 0,29 для высокотемпературной зоны до 0,37 для низкотемпературной зоны.

Относительно значений  $K_{\text{топ}}^{\text{опт}}$ , отвечающих оптимальной величине  $\beta_{\text{опт}}$ , следует отметить, что согласно полученным данным эти значения для низкотемпературной и высокотемпературной зоны Украины отличаются незначительно. Причем в случае низкотемпературной коэффициент  $K_{\text{топ}}^{\text{опт}}$  оказывается несколько выше.

### Выводы

1. Выполнена оценка энергетической эффективности зданий в условиях применения комбинированных систем теплоснабжения с традиционным водяным отоплением и электрическим отоплением прямого действия. Представлены данные об эффективности таких систем при различной доле теплопотерь зданий, которые компенсируются электронагревом.

2. Для различных температурных зон Украины определены оптимальные значения доли, компенсируемы электронагревом теплопотерь здания, которые отвечают его наибольшей энергетической эффективности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пырков В.В. Электрические кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление. – Киев: ООО «Медиа-Макс», 2004. – 88 с.

2. *Енергоощадна технологія електро теплоаккумуляційного обігріву в житлово-комунальному та аграрно-промисловому комплексах України / Під.ред. Д.Й. Розинського.* – Київ: Видавництво Купріянова О.О., 2007. – 272 с.

3. *Сучасний стан і основні напрямки застосування електричної енергії для теплопостачання в Україні / Під. ред. акад. НАНУ А.А. Долінського, к.т.н. Д.Й. Розинського.* – Київ: Видавництво Купріянова О.О., 2009. – 252 с.

4. *Фиалко Н.М.* Энергетическая эффективность комбинированных систем традиционно и электрического отопления зданий / Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Прокопов В.Г., Меранова Н.О., Гнедой Н.В., Иваненко Г.В., Юр-

чук В.Л., Гнедаш Г.А. // Промышленная теплотехника. – 2011, №5. – С. 49 – 59.

5. *Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України про тарифи, диференційовані за часом доби, № 529 від 19.07.2005.*

6. *Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України «Про затвердження Роздрібних цін на природний газ, що використовується для потреб населення, Міжнародного дитячого центру «Артек» і Українського дитячого центру «Молода гвардія» № 812 від 13.07.2010.*

7. *Зміна №1 ДБН В.2.6-31: 2006.*

## ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS WITH COMBINED HEATING SYSTEMS BASED ON GAS CONSUMING BOILERS AND ELECTRICAL SYSTEMS OF DIRECT ACTION

**Prokopov V.G.**

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

The present work is devoted to investigation of the energy efficiency of buildings in the use of combined heating systems, which along with the traditional water heating using electric heating of direct action. Particular attention is paid to the comparison of the effectiveness of such systems at different share of heat loss, electrically compensated. A comparative analysis of the energy efficiency of these engineering systems and water heating system with gas consumption and electric boilers are submitted. The results of

studies to determine of the optimal value of heat loss for the concerned system of combined heating are presented. References 7, Fig 4.

**Key words:** combined heating systems of buildings, thermal losses, efficiency.

1. *Pyrkov V.V.* Electric cable heating system. Energy comparison. – Kiev: ООО «Media-Maks», 2004. – 88 p. (Rus.)

2. *Energy-saving technology* heat accumulative electric heating in housing and agro-industrial complex of Ukraine / Edited by D.I. Rozynsky. – Kyiv: Publishing Kupriyanov O.O., 2007. – 272 p. (Ukr.)

3. *Current status and main directions* using of electricity for heating in Ukraine / Edited by Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinsky and Ph.D. D.I. Rozynsky. – Kyiv: Publishing Kupriyanov O.O., 2009. – 252 p. (Ukr.)

4. *Fialko N.M.* The energy efficiency of the combined systems of traditional and electric heating of buildings Fialko N.M., Sherenkovsky

Ju.V., Prokopov V.G., Meranova N.O., Gnedoj N.V., Ivanenko G.V., Jurchuk V.L., Gnedash G.A. // Industrial heat engineering. – 2011, №5. – P. 49 – 59. (Rus.)

5. *Resolution of the National Electricity Regulatory Commission of Ukraine on tariffs, differentiated by time of day, № 529, 19.07.2005.* (Ukr.)

6. *Resolution of the National Electricity Regulatory Commission of Ukraine "On Approval retail prices for natural gas used for the needs of the population, International Children's Center" Artek " and Children's Center of Ukrainian "Young Guard ", № 812, 13.07.2010.* (Ukr.)

7. *Change № 1 to the state building codes V.2.6 – 31: 2006.* (Ukr.)

*Получено 05.12.2014*

*Received 05.12.2014*

УДК 662.997

## ПАССИВНЫЕ ДОМА В УКРАИНЕ И СТРАНАХ СНГ

Божко И.К., Лысенко О.Н., Гончарук С.М., Калинина М.Ф., канд. техн. наук

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

Проведено короткий огляд та наведені умови і перспективи створення пасивних будинків в Україні та країнах СНД.

Проведен краткий обзор и указаны условия и перспективы создания пассивных домов в Украине и странах СНГ.

A brief overview and perspectives are provided and create passive houses in Ukraine and countries of UIC.

Библ. 22, рис. 9.

**Ключевые слова:** энергосбережение, энергоэффективность, пассивный дом.

Одной из основных целей энергетической стратегии Украины на период до 2030 года является снижение удельных затрат в производстве и использование энергетической продукции за счет рационального ее потребления, внедрения энергосберегающих технологий и оборудования, рационализации структуры общественного производства и снижение удельного веса энергоемких технологий. Решение данной задачи возможно путем создания предпосылок для коренного уменьшения энергоемкости отечественной продукции за счет внедрения новых технологий, прогрессивных стандартов, современных систем контроля, управления и учета на всех этапах производства, транспортировки и потребления энергетических продуктов; развитие рыночных механизмов стимулирования энергосбережения во всех отраслях экономики [1].

В частности, решение проблемы энергосбережения в коммунальной энергетике возможно путем строительства энергоэффективных, пассивных сооружений, зданий «ноль энергии» и «ноль энергии +». Большинство зданий, эксплуатируемые в Украине, довольно сложно привести до уровня энергоэффективного сооружения, поэтому весомый акцент необходимо ставить именно на строительство новых зданий с высоким классом энергоэффективности.

В статье рассмотрим некоторые из реализуемых проектов энергоэффективных зданий в Украине и странах СНГ.

**Украина.** Энергосберегающие здания в Украине сейчас находятся лишь на начальном этапе развития. Только в последние несколько лет по-

явился практический интерес к энергосберегающим строительным и инженерным технологиям. Одним из сдерживающих факторов строительства домов нового типа выступают высокие финансовые затраты при строительстве.

Важным фактором при сооружении энергоэффективных зданий является владение достоверной информацией по теплотехническим характеристикам энергосберегающих внешних ограждающих конструкций и систем тепло-, водо-, электроснабжения и вентиляции в реальных условиях их длительной эксплуатации. Именно с этой основной целью в Институте технической теплофизики НАН Украины построено научно-техническую технологическую теплофизическую лабораторию по энергоэффективности зданий, которая представляет собой энергоэффективный дом пассивного типа «ноль энергии» (рис. 1).

Основным преимуществом этого дома среди зданий пассивного типа, построенных в Украине, является создание разветвленной автоматизированной измерительной системы, которая оснащена теплосчетчиками, счетчиками электроэнергии, датчиками температуры, теплового потока, влажности и соответствующими измерительно-контрольными устройствами, компьютерной системой сбора, обработки и визуализации данных. Также внедрены различные современные системы, использующие альтернативные и возобновляемые источники энергии (энергия солнечного прямого и рассеянного излучения, энергия ветра, энергия сжигания твердого биотоплива для резервного или аварийного теплоснабжения, те-

пловая энергия природного грунта, воздуха, воды в водозаборной скважине, утилизация тепловая энергия уходящих дымовых газов и т.д.). Измерительные датчики размещаются в строительных конструкциях, в системах теплоснабжения и вентиляции, в окружающей почве, воздухе и помещениях (непрерывные измерения полей температур, тепловых потоков, влажности, давления, расхода воздуха, расхода воды, расхода тепловой энергии, внешних климатических параметров).

Особенности конструкции дома: здание строится как сооружение облегченного типа (облегченные плиты перекрытия и стены) без потерь прочностных характеристик, с различными вариантами схем утепления ограждающих конструкций, цоколь углублен в грунт до 2,5 м, на северной стороне без окон и дверей, основной вход через тамбурную пристройку. Данное здание состоит из двух этажей, цокольного этажа, мансарды и неотапливаемого технического помещения для размещения вентиляционной установки рекуперативного типа и экспериментальной тепловой холодильной камеры, которая позволяет определить теплофизические характеристики строительных материалов в реальных условиях их эксплуатации. В сооружении реализована односкатная крыша, ориентированная на юг под углом  $33^\circ$ , что в свою очередь позволяет эффективно использовать ее площадь для размещения на ней солнечных коллекторов. С материалов для сооружения несущей конструкции здания используются отечественные строитель-

ные материалы: пено- и газобетон, ракушник, арболит, шлакоблоки, дерево, керамические блоки, керамический дырчатый кирпич и т.п. Причем каждая внешняя стена в помещениях дома построена из различного строительного материала. С целью установления максимально возможной теплоизоляции здания, для утепления применяются различные варианты внешнего утеплителя. Теплоизоляционный слой энергоэффективного пассивного дома составляет так называемую тепловую воздушную завесу, обеспечивающуюся теплотой грунта.

Разработанная поливалентная система теплообеспечения здания пассивного типа на основе теплового насоса и гелиоколлекторов предусматривает систему, которая регулируется в зависимости от температур внешнего и внутреннего воздуха. В связи с этим, разработано три режима работы, в зависимости от необходимости в тепло- или холодоснабжении дома: летний (когда температура наружного воздуха выше  $21^\circ\text{C}$ ), переходной (температура наружного воздуха колеблется от  $8^\circ\text{C}$  до  $21^\circ\text{C}$ ) и зимний режимы (температура наружного воздуха ниже  $8^\circ\text{C}$ ). Электрообеспечение дома представляет собой систему, которая содержит лопастной ветроагрегат пропеллерного типа, систему электроаккумуляции высокой емкости, солнечные фотовольтаические панели, а также комбинированные солнечные панели, когенерационную установку, термоэлектрические модули.

Вентиляция – трехвалентная система: 1) при-



**Рис. 1. Энергоэффективный дом пассивного типа «ноль энергии» (Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина).**

точно-гравитационная пассивная система; 2) принудительная вентиляция через грунтовые теплообменники; 3) приточно-вытяжная рекуперативная система (с возможностью дополнительного нагрева воздуха теплоносителем из системы отопления) [2-4].

Еще один пример реализованного в Украине проекта пассивного здания это экодом под названием дом «Солнца», который построен в г. Киеве в 2008 году (рис. 2, а). С 2010 года зданий архитектора «Дома Солнца» в разных городах и селах Украины стало уже несколько. Среди них: пассивный дом «Солитер» в с. Зозули Васильковского р-на Киевской обл. (рис. 2, б), в с. Боромики Черниговской обл. (рис. 2, в), пассивный детский дом семейного типа «Холм-Экодом» в с. Михайловка Каневского р-на Черкасской обл. (рис. 2, г), экодому в г. Симферополь (рис. 2, д) и с. Ясногородка Макаровского р-на Киевской обл. (рис. 2, е) и т. д.

Все эти дома созданы одним автором по одним и тем же основным принципам строительства пассивных домов, а именно: использование для строительства природных и экологически чистых материалов, не выделяющих вредных эмиссий при их эксплуатации; применение в конструкциях здания достаточного количества аккумулирующего (зимой – холод, летом – тепло) массива стен и перекрытий. Ориентация оконных конструкций на юг позволяет получать максимальное количество солнечной энергии в зимнее время.

Также к пассивным системам тепловой защиты здания можно отнести: глухую изоляцию северного фасада (отсутствие окон и дверей); расположение на севере вспомогательных зон, которые были бы "тепловым буфером" между холодным и теплым жилым пространством; устройство качественной теплоизоляции и обеспечение герметичности здания; отсутствие тепловых мостов в тепловой оболочке здания; использование во внутренней отделке помещений природных диффузионно-открытых материалов (глина, бумажные обои, дерево, натуральный линолеум и др.). Уравновешивание относительной влажности воздуха в помещениях и постоянное поддержание ее на уровне 50 %, отказ от конвекционных систем отопления и охлаждения зданий, которое, по мнению некоторых специалистов,

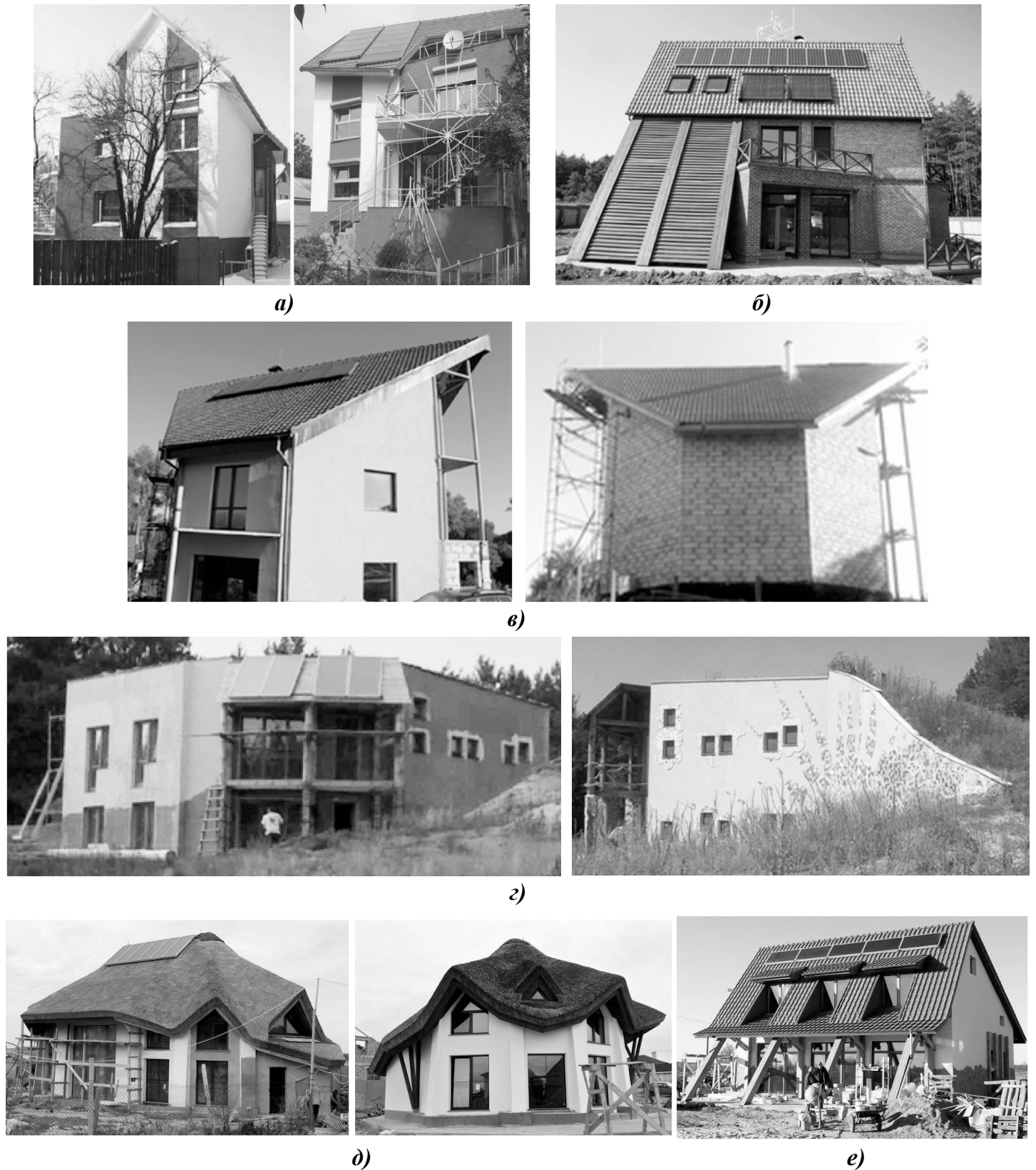
приводит к перегреву и пересыханию воздуха зимой и значительного переохлаждения его летом.

Использование низкотемпературных систем отопления и охлаждения здания с помощью излучающих настенных теплообменников и применение системы контролируемой приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты создают комфортные условия для пребывания человека внутри здания в течении всего года. Уменьшение количества энергии для производства строительных материалов и конструкций, а также использования местных материалов снижают затраты энергии на транспортировку элементов. Использование строительных материалов, производство, эксплуатация и утилизация которых не влияет на окружающую среду, а также, утилизация и вторичное использование отходов производства значительно снижает воздействие на окружающую среду.

Использование меньшего количества энергии для отопления, охлаждения и вентиляции здания; использование инженерных систем с высоким КПД на основе возобновляемых источников энергии; правильно составленного и рассчитанного теплового баланса здания (в том числе и учёт теплопоступлений от людей и бытовых приборов) составляют основную статью повышения энергоэффективности здания [5-7].

Одним из примеров частных энергоэффективных домов пассивного типа – здание, построенное под Киевом (рис. 3). При строительстве для столбов фундамента выбрана металлическая труба диаметром 100 мм, высота столба – 1000 мм. Так как уровень поверхности участка неровный, то высота столбов, выступающих над землей, колебалась от 300 до 500 мм. Столбы соединялись уголками, на которые ложилось листовое оцинкованное железо. Листы укладывались внахлест, соединялись заклепками и герметизировались бутиловой лентой. Поверх оцинкованного железа укладывалась полиэтиленовая пленка для обеспечения гидроизоляции пола. Заполнение пространства стен, пола, перекрытий и потолков проводилось жидким пеноизолом, который заполняет все полости и создает сплошной (без разрывов) слой теплоизоляции. Появление «мостиков холода» при использовании такой технологии – невозможно.

Для строительства каркаса стен выбран де-



**Рис. 2. Примеры пассивных домов в Украине (г. Киев (а), с. Зозули Васильковского р-на Киевской обл (б), с. Боромики Черниговская обл. (в), с. Михайловка Каневского р-на Черкасская обл. (г), г. Симферополь (д), с. Ясногородка Макаровского р-на Киевской обл. (е)) [5].**



*Рис. 3. Частный энергоэффективный дом пассивного типа в Киевской обл. (Украина) [8].*

ревянный брус сечением (50×150) мм. Каркас обшит плитами ОСП, прочность которых в полтора раза выше, чем прочность дерева такой же толщины. Толщина стены между плитами ОСП – 150 мм. Это пространство заполнялось пеноизолом. Пеноизол не горит (пожароустойчив), его не едят грызуны и при попадании в почву служит удобрением.

Крыша плоская и закрыта ПВХ мембраной белого цвета. Периметр эксплуатируемой крыши закрывается застекленным парапетом. Каркас стеклянной галереи дома изготавливается из фасадного алюминиевого профиля. Остекление – самоочищающееся стекло толщиной 6 мм. Дом, площадью 395 м<sup>2</sup> был построен за три месяца. Эквивалентное сопротивление теплопередачи  $R = 10 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Измерения проводились при температуре наружного воздуха – минус (20 ... 25) °С. Для поддержания постоянной температуры внутри дома достаточно источника теплоты мощностью до 2 кВт. При этом потери теплоты на первых двух этажах, площадью 233 м<sup>2</sup> составили 900 Вт/ч, потери теплоты на третьем этаже, площадью 39,6 м<sup>2</sup> – 600 Вт/час.

Большое различие в потере теплоты на квадратный метр площади пола объясняется тем, что первые два этажа закрыты галереей от холодного ветра. Третий этаж не защищен галереей, а вытянутая форма с большой площадью стен способствует дополнительному увеличению потерь теплоты. Общий объем здания составил 1076 м<sup>3</sup>: объем застекленной галереи – 379 м<sup>3</sup>, «теплая» часть дома – 697 м<sup>3</sup>.

Вентиляция здания: наружный воздух поступает в застекленную галерею через теплообменное устройство, расположенное под водой (или

землей). Температура воды на дне озера не опускается ниже 4 °С зимой и 10 °С – летом. Таким образом, холодный зимний воздух нагревается до +4 °С, а теплый летний воздух – охлаждается до +10 °С. Далее воздух из галереи, через приточно-вытяжные системы с рекуперацией тепла, поступает в «теплую» часть дома. После рекуператора приточный воздух поступает в систему очистки где он увлажняется или осушается.

Для обогрева трех этажей пассивного дома применена многоярусная система отопления. Для этого на втором и третьем этажах установлены, изготовленные из нержавеющей стали, теплонакопительные колпаки. Колпак представляет собой перевернутый вверх дном сосуд, в котором вход горячих дымовых газов из печи, и выход охлажденных, расположены в противоположных сторонах нижней части. Разогретый до 300... 400 °С газ из печи поступает в колпак на втором этаже. Охлаждаясь в колпаке газ, опускается вниз к выходу и по трубе поступает в такой же колпак на третьем этаже. Отдав теплоту на третьем этаже, максимально охлажденный газ выходит через трубу на улицу. Поскольку отбор теплоты дымовых газов происходит на достаточно большом расстоянии от топки, то это значительно повышает эффективность сгорания топлива. Такой многоярусный отбор теплоты более чем вдвое увеличивает эффективность использования топлива. Печь на дровах можно легко заменить тепловым насосом или электрическим обогревателем [8].

**Молдова.** Первый пассивный дом в Молдове был построен в районе Кодру, в 5 км от города Кишинева в 2013 году. Рабочее название проекта Passivhaus Codru Quince (PCQ) (рис. 4). PCQ –

это 3-х этажный частный жилой дом площадью 301,3 м<sup>2</sup> [9].

Солнечная инсоляция поступает в пассивный дом через двухкамерные металлопластиковые окна с энергосберегающим низкоэмиссионным покрытием. Пассивный дом PCQ размещен на склоне холма, угол наклона которого около 10° и направлен на юго-запад. PCQ ориентирован по сторонам света с углом поворота на 23° в юго-восточном направлении, в связи с особенностями ландшафта местности. Это способствует получению максимальных поступлений теплоты от солнечной радиации в течение зимнего периода. Именно на этом фасаде сосредоточены основные светопрозрачные конструкции, в то время, как на северо-западном фасаде расположены только два небольших окна.

В проекте пассивного дома PCQ реализуются конструкции каменно-железобетонного здания: железобетонный каркас с заполнением внешних стен местным материалом – каменными блоками «Котилец» толщиной 390 мм – с армированием кладки металлической сеткой. Фундамент дома – железобетонные блоки по монолитной плите с поясом по верху фундамента. Учитывая крутизну склона строительной площадки и неблагоприятное состояние почв (под основанием фундамента наличие трещин, возможность обводнения т.д.), проектированию фундамента было предоставлено особое внимание. Проектом также предусмотрено подпорную стенку, предотвращающую возможность оползней по склону.

Для обеспечения низких тепловых потерь

здания все внешние поверхности ограждающих конструкций – стен, крыш, плит по грунту – покрыты сплошным слоем тепловой изоляции толщиной 200 мм. При РНПП расчетах вычислено использования несколько вариантов тепловой изоляции ограждающих конструкций: натуральный целлюлозный утеплитель – эковата «Юнизол» ( $\lambda = 0,04$  Вт/(м·°С)) [10], плитный утеплитель «RockWool» ( $\lambda = 0,038-0,041$  Вт/(м·°С)) [11], плитный утеплитель «Celotex FR5000» ( $\lambda = 0,021$  Вт/(м·°С)) [12] и утеплитель из пенополиуретана ( $\lambda = 0,02$  Вт/(м·°С)).

Системой теплоснабжения пассивного дома предусмотрено использование системы вентиляции с рекуперацией теплоты. В качестве источника тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения используются солнечные тепловые коллекторы.

Одним из путей снижения использования электрической энергии, которые были воплощены в проекте, является использование энергоэффективного светодиодного освещения в помещениях. Планируется достичь дополнительного сбережения энергии за счет внедрения технологий «Умный Дом».

Согласно с проведенными расчетами энергетических балансов пассивного дома PCQ удельное потребление энергии для отопления составляет 12 кВт·час/(м<sup>2</sup>·год); удельное потребление первичной энергии (ГВС, отопление, охлаждение, электроэнергия и бытовые приборы) составляет 65 кВт·час/(м<sup>2</sup>·год).

Плановое подорожание строительства: + 10 %



Рис. 4. Эскиз проекта пассивного дома PCQ (Молдова) [10].

в сравнении с обычными домами Молдовы. Плановые сбережения средств за использование энергии на отопление составляют 930...1030 долларов в год (за отопительный период).

**Белоруссия.** Впервые о намерениях создания пассивного дома в Беларуси стало известно еще в 2011 году [13]. В 2012 г. в Дзержинске начались строительные работы по созданию первого частного пассивного жилого дома [14]. Преимуществами такого жилища является минимальное потребление энергии и отсутствие влияния на окружающую среду.

В основу концепции легли немецкие стандарты «пассивного» дома, созданные еще в 90-е годы.

Ожидается, что дом будет использовать примерно в 4 раза меньше энергии, чем стандартные частные здания. А именно – около 2,5 кубометров природного газа на квадратный метр в год. Также особого внимания заслуживает приточно-вытяжная система вентиляции, обеспечивающей целый год поступление свежего воздуха.

**Армения.** Официальное открытие жилого дома (рис. 5), построенного в рамках программы "Социальное жилье в благоприятных условиях – Горис-2", произошло 18 декабря 2012 в г. Горис Сюникской области Армении [15].

Мероприятия по повышению энергетичес-

кой эффективности здания включили теплоизоляцию внешних стен, колонн, балок и перекрытий здания, установку энергоэффективных окон и дверей. Для обеспечения контроля использования горячей воды и энергии во всех квартирах были установлены аллокаторы теплоты и счетчики горячей воды. В квартирах, а также в общих помещениях дома, были установлены энергоэффективные системы освещения. Впервые в строительной практике Армении на окнах здания были установлены приточные клапаны, с целью обеспечения достаточной вентиляции квартир и избегания температурных колебаний.

В результате внедрения энергоэффективных мероприятий существенно повысилось качество жилищных условий в квартирах, а затраты на энергию для жителей снизились более, чем на 50 %.

**Россия.** Общая площадь всех зданий, эксплуатируемых в России составляет около 5 млрд. м<sup>2</sup>. Для их отопления необходимо 400 млн. тонн условного топлива в год или более трети энерго-ресурсов страны. Особенно остро эта проблема стоит в коммунальном хозяйстве, которое потребляет до 20 % электрической и 45 % тепловой энергии, производимой в стране. На единицу жилой площади в России расходуется в 2...3 раза больше энергии, чем в Европе. И это не является следствием холодного климата. Несмотря на



*Рис. 5. Энергоэффективный жилой дом в г. Горис (Армения) [16].*

суровые условия, вопросам энергосбережения не оказывалось серьезное значение – благодаря крайне низкой стоимости энергии.

Инновационный центр "Сколково" (рис. 6). Согласно информации фонда "Сколково", первым зданием, построенным на территории этого инновационного центра, будет "Зеленый дом", разработан с использованием современных энергосберегающих технологий [16].

Инноград «Сколково» – это особая территория в Московской области, где будут созданы специальные условия для разработок и исследований в области энергосбережения и энергоэффективности, телекоммуникационных, ядерных, компьютерных и биомедицинских технологий. Кроме этих направлений работы, в иннограде будет еще одно приоритетное направление – эффективное градостроительство. В рамках этого направления на основе энергоэффективных технологий планируется возвести так называемый "Зеленый дом" по аналогии с датским проектом "Зеленый маяк" (рис. 7) [17].

«Зеленый маяк» (Green Lighthouse) – трехэтажное административное здание, принадлежащее к датскому государственному университету. Здание имеет цилиндрическую форму с точки зрения уменьшения потерь, поскольку именно цилиндр имеет минимальную площадь поверх-

ности, что приводит к снижению тепловых потерь фасада здания.

Для минимизации выработки углекислого газа в проекте Green Lighthouse внедрен комплекс энергосберегающих технологий и приняты меры для формирования здорового микроклимата в помещениях. Ориентация здания в пространстве осуществлена таким образом, чтобы максимально использовать солнечную энергию, в то время как окна и двери снабжены автоматическими защитными экранами, препятствующие нагреву помещения прямыми солнечными лучами. Мягкий свет, пронизывающий все помещения, и естественная вентиляция достигаются благодаря световым потолочным люкам и огромным атриумом в центре дома. В техническом оснащении здания рационально использованы самые передовые технологии энергосбережения: солнечное теплоснабжение, фотогальванические панели, использование LED – светодиодов для освещения помещений, геотермальное отопление и т.д.

**Москва.** Проект "Энергоэффективный жилой дом в микрорайоне Никулино-2" (экспериментальный 16-этажный дом) был реализован в 1998-2002 годах в рамках "Долгосрочной программы энергосбережения в Москве". Для мероприятий по энергосбережению, были исполь-



*Рис. 6. Энергоэффективный инновационный центр в Сколково (Россия) [17].*



*Рис. 7. Экологически чистое здание "Зеленый маяк" (Дания) [18].*

зованы как современные энергосберегающие технологии (тепловые насосы, автоматизация жизнеобеспечения, ИТП), так и внешние ограждающие конструкции с повышенной теплозащитой. Целью проекта было создание, натурная апробация и последующее внедрение в жилищное строительство города новейших технологий и оборудования, обеспечивающих, как минимум, двукратное снижение энергетических затрат на эксплуатацию жилого фонда.

Стратегия проекта предусматривала реализацию трех основных этапов: 1) проведение измерительной компании по натурной оценке теплового режима типового жилого дома (базовый дом); 2) проведение комплексных научных исследований и разработка проекта энергоэффективного жилого дома; 3) строительство энергоэффективного жилого дома и проведение измерительной компании по натурной оценке его теплового режима [18].

В результате проведения комплексных научных исследований был применен ряд конструктивных решений для повышения энергоэффективности здания: меры по повышению уровня теплозащиты внешних ограждающих конструкций, которые, за счет применения современных энергоэффективных материалов и качественного проекта, позволили снизить общие затраты энергии здания на 34 %.

Мероприятия по совершенствованию системы энергообеспечения здания: энергообеспечение здания осуществляется как от внешних источников тепловой и электрической энергии, так и от внутренних – тепловых насосов, использующих теплоту грунта и теплоту удаленного вентиляционного воздуха.

В рамках этого проекта была создана теплонасосная система горячего водоснабжения многоэтажного дома. Поскольку режим работы тепловых насосов, использующих теплоту земли и теплоту удаляемого воздуха, постоянный, а потребление горячей воды переменное, система горячего водоснабжения оборудована баками-аккумуляторами. Система горячего водоснабжения предусматривает два температурных уровня аккумуляции горячей воды. Первый – низкотемпературный, обеспечивается тепловыми насосами; второй – высокотемпературный – ТЭНами,

которые включаются в ночное время суток.

Отопительные приборы – конвекторы, расположенные в подоконном пространстве. Регулирование их теплоотдачи производится терморегуляторами, установленными на конвекторах. В здании установлена поквартирная двухтрубная горизонтальная система водяного отопления с теплосчетчиком на кухне и с термостатическими вентилями на каждом отопительном приборе. Эта система обеспечивает возможность поквартирного учета тепловой энергии и индивидуального регулирования температуры воздуха в помещениях без изменения теплового режима соседних помещений.

**Якутия.** Первый энергоэффективный 33-х квартирный дом (рис. 8) в поселке Жатай Республики Саха (Якутия) введен в эксплуатацию в 2011 году [19].

В доме предусмотрена усиленная тепловая изоляция стен, цокольного и чердачного перекрытий, за счет чего теплопотери снижены на 10 %, двухкамерные окна с аргоновым заполнением позволяют снизить теплопотери на 30%. Также создается эффект «дома-термоса» за счет заключения мокрой штукатурки по пластиковой сетке, что практически исключает поступление холодного воздуха извне.

В «умном доме» предусмотрено автоматическое поддержание температуры теплоносителя в зависимости от внешней температуры, дистанционное управление параметрами теплоносителя с помощью электронного узла управления, приборы учета расхода количества теплоты и воды в системе отопления, холодного и горячего водоснабжения. Кроме того, освещение помещений предусмотрено с автоматическим управлением – установлены датчики движения и



*Рис. 8. Энергоэффективный дом (Якутия, Россия) [20].*

освещенности. Светильники в помещениях оснащены светодиодными лампами, что позволяет экономить до 90 % электроэнергии. В квартирах предусмотрена рекуперация теплоты выходящего воздуха, которая дает экономию энергии на подогрев воздуха до 50 % и регулирования приборов отопления термостатами. Благодаря применению энергоэффективных технологий жители «умного дома» смогут значительно экономить на платежах за жилищно-коммунальные услуги – по расчетам до 40...45 %.

**Барнаул.** В столице Алтайского края, городе Барнауле, сдан первый энергоэффективный дом (рис. 9). В доме установлены солнечные коллекторы для освещения мест общего пользования. Также солнечные коллекторы используются и для горячего водоснабжения. Внедрена система рекуперации, что позволяет нагревать входящий воздух, используя тот, что удаляется. Для обеспечения жителей отоплением и горячей водой создано специальное тепловое поле. Оконное стекло изготовлено с применением нанотехнологий. На него нанесен специальный состав, который обеспечивает сохранение теплоты. Дом имеет высокий класс энергоэффективности "А". Общая экономия энергии составляет 52 % [20].

**Новосибирск.** С 1987 года в Новосибирском Академгородке на базе институтов СО РАН создано общественное объединение «Сибирский эксперимент» для строительства индивидуальных домов сотрудникам институтов. Одновременно организован инженерно-технический «Центр экологического домостроения». В 1992 году был разработан первый про-



*Рис. 9. Энергоэффективный дом (Барнаул, Россия) [21].*

ект «экопоселок» для комплексной малоэтажной застройки территории [21-22].

### **Выводы**

В Украине и странах СНГ существует достаточно большое количество организаций, предприятий частного типа, которые занимаются внедрением энергосберегающих технологий, решающие задачи по снижению энергопотребления и использования альтернативных и возобновляемых источников тепловой энергии, активно пропагандирующее пассивное строительство, приводящие концептуальные условия его создания, но никто не предоставляет мониторинг энергопотребления и конкретные полученные результаты. Поэтому именно этот не решенный вопрос имеет весомое значение на сегодняшний день.

При создании концептуальных условий сооружения зданий пассивного типа одной из существенных условий получения точных и качественных результатов их эксплуатационных характеристик является учет местных климатических данных, которые могут служить определяющим фактором для достижения критериев пассивного дома.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року.* Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 1071, Київ, 2013. – 166 с.
2. *Експериментальний дом типу «ноль енергії»* [Електронний ресурс] / Інститут технічної теплофізики НАН України, відділ теплофізических основ енергосберегаючих теплотехнологій. – Режим доступу URL: [www://itf.kiev.ua/ru/експериментальний-дом-типа-ноль-ене/#moge-3125](http://itf.kiev.ua/ru/експериментальний-дом-типа-ноль-ене/#moge-3125) (дата обращения: 12.05.2014).
3. *Долінський А.А.* Концептуальні основи створення експериментального будинку типу «ноль енергії» [Текст] / А.А. Долінський, Б.І. Басок, О.М. Недбайло, Т.Г. Беляєва, М.А. Хибина, М.В. Ткаченко, М.П. Новіцька // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – Вип. 77. – С. 222 – 227.

4. Гончарук С.М. Створення експериментального енергоефективного будинку пасивного типу «нуль енергії» [Текст] / С.М. Гончарук, М.Ф. Калініна, І.К. Божко та ін. // Пром. теплотехніка – 2014. – Т. 36, №3. – С. 88-95.
5. Сайт архітектурного бюро “Архітектура і Екологія” [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <http://www.ernst.kiev.ua> (дата звернення: 12.05.2014).
6. Ернст Т. Екоsvідомість нації як перед основа переходу до зеленого будівництва [Текст] / Т. Ернст // Екоінформ. – 2011. – № 6. – С. 8-10.
7. Екологічна концепція будівлі: “пасивний екодiм” [Текст] / Т. Ернст // Екоінформ. – 2011. – №9. – С. 47.
8. Сайт підприємства ТЕХНОЛУЧ [Електронний ресурс] / Енергопасивний дом. – Режим доступу URL: <http://tehnoluch.com/> (дата звернення: 12.05.2014).
9. Пасивний будинок. Енергоефективність, екологічність, якість комфорт [Електронний ресурс] / Пасивний Будинок Passivhaus Codru Quince. – Режим доступу URL: <http://passivehouse-igua.com/2012/08/07/passivhaus-codru-quince-moldov/> (дата звернення: 12.05.2014).
10. Целлюлозний утеплитель Юнизол [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <http://unisol.com.ua/index.php> (дата звернення: 12.05.2014).
11. RockWool: негорючая ізоляція [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <http://www.rockwool.ua/> (дата звернення: 12.05.2014).
12. Celotex [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <http://www.celotex.co.uk/products/fr5000> (дата звернення: 12.05.2014).
13. Дмитро Жуков – «Белорусский пассивный дом: To Be, Or Not To Be...» [Текст] // Архитектура и строительство №1 (219) 2011г.
14. Первый пример пассивного дома в Беларуси [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <http://realt.by/news/article/10548/> (дата звернення: 12.05.2014).
15. Энергоеффективное здание в г. Горисе открыло двери для 20 семей [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://am.beesa.net/poslednie-novosti/250> (дата обращения: 12.05.2014).
16. Энергоеффективные дома. История и перспективы развития. [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: [http://www.ecology.md/section.php?section=ecoset&id=4928#.U2jKyof\\_vSn](http://www.ecology.md/section.php?section=ecoset&id=4928#.U2jKyof_vSn) (дата обращения: 12.05.2014).
17. Зеленый маяк – здание задающее новый тренд в эко архитектуре. [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: [http://www.lightonline.ru/svet/Architecture/Green\\_LightHouse.html](http://www.lightonline.ru/svet/Architecture/Green_LightHouse.html) (дата обращения: 12.05.2014).
18. Энергоеффективный дом: [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://www.geaudit.ru/stati/energoeffektivniy-dom> (дата обращения: 12.05.2014).
19. Энергоеффективный дом в условиях вечной мерзлоты стал реальностью в Якутии: [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://energodoma.ru/novosti/novosti/932-energoeffektivnyj-dom-v-usloviyakh-vechnoj-merzloty-stal-realnostyu-v-yakutii> (дата обращения: 12.05.2014).
20. Первый энергоэффективный дом открыт в Алтайском крае. [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/pervyi-energoeffektivnyi-dom-otkryt-v-altayskom-krae> (дата обращения: 12.05.2014).
21. Сайт института теплофизики им. С.С. Кутателадзе / Экодом. [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <http://www.itp.nsc.ru/ecodom/> (дата обращения: 12.05.2014).
22. Чунтонов В.С. Опыт проектирования экодома и экопоселения [Текст] / В.С. Чунтонов // Научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 19–20 марта. – 2013. – С. 23 – 31.

## PASSIVE HOUSES IN UKRAINE AND COUNTRIES OF UIC

**Bozhko I.K., Lysenko O.N., Goncharuk S.M., Kalinina M.F.**

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

The aim is an overview of passive houses built in Ukraine and countries of UIC. It is shown that this type of energy-efficient construction is possible in countries with different climate (from temperate continental to continental). The task of the work – a comparison of the passive house, which was built at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine with similar houses located in the countries of UIC. Achieved analytical comparison, a comparative analysis of designs and systems of heating of passive homes. Given a description of the design and engineering systems of passive houses in Ukraine and countries of UIC. Shows the status and prospects of development of energy-efficient construction. References 22, figures 9.

**Key worlds:** energy conservation, energy efficiency, passive house.

1. *Energy Strategy of Ukraine until 2030*. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine of 24 July 2013 p. № 1071, Kyiv, 2013. – 166 p. (Ukr.)

2. *The pilot house of the "zero energy"* [Electronic resource] / Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Department of thermophysical bases of energy-saving heat technologies. – Access URL: [www://ittf.kiev.ua/ru/eksperimentalnyy-dom-tipa-nol-ene/#more-3125](http://www://ittf.kiev.ua/ru/eksperimentalnyy-dom-tipa-nol-ene/#more-3125) (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

3. *Dolinskiy A.A.* The conceptual basis for the creation of experimental building of the "zero energy" [Text] / A.A. Dolinskiy, B.I. Basok, O.M. Nedbaylo, T.G. Belyaeva, M.A. Hybyna, M.V. Tkachenko, M.P. Novitska // *Budivelni konstruktsii:*

*Mizhvidomchy naukovo-tehnichny zbirnik.* – 2013. – Vol. 77 – P. 222 - 227. (Ukr.)

4. *Goncharuk S.M.* Create energy efficiency experimental passive house of the "zero energy" [Text] / S.M. Goncharuk, M.F. Kalinina, I.K. Bozhko etc. // *Prom. teplotekhnika.* – 2014. – Vol. 36, №3. – P. 88-95. (Ukr.)

5. *Site of architectural office "Architecture and Environment"* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.ernst.kiev.ua> (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

6. *Ernst T.* Environmental consciousness of the nation as a base to go to the green building [Text] / T. Ernst // *Ekoinform.* – 2011. – № 6. – P. 8-10. (Ukr.)

7. *Environmental concept building "passive environmental house"* [Text] / T. Ernst // *Ekoinform.* – 2011. – №9. – P. 47. (Ukr.)

8. *Business Website TEHNOLUCH* [electronic resource] / Energy-passive house. – Access URL: <http://tehnoluch.com/> (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

9. *Passive House.* Energy efficiency, environmental friendliness, quality, comfort [Electronic resource] / Passive House Passivhaus Codru Quince. – Access URL: <http://passivehouse-igua.com/2012/08/07/passivhaus-codru-quince-moldov/> (circulation date: 12.05.2014). (Ukr.)

10. *Cellulose insulation Yunizol* [Electronic resource]. – Access URL: <http://unisol.com.ua/index.php> (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

11. *RockWool: non-combustible insulation.* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.rockwool.ua/> (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

12. *Celotex* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.celotex.co.uk/products/fr5000> (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

13. *Dmytro Zhukov – "Belarusian passive house: To Be, Or Not To Be ..."* [Text] // *Architecture and building №1 (219) 2011.* (Rus.)

14. *The first example of a passive house in Belarus* [Electronic resource]. – Access URL: <http://realt.by/news/article/10548/> (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

15. *Energy-efficient building in Goris has opened its doors to 20 families* [Electronic resource].

– Access URL: <http://am.beeca.net/poslednie-novosti/250> (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

16. *Energy-efficient home. History and development prospects.* [Electronic resource]. – Access URL: [http://www.ecology.md/section.php?section=ecoset&id=4928#.U2jKyof\\_vSn](http://www.ecology.md/section.php?section=ecoset&id=4928#.U2jKyof_vSn) (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

17. *Green Lighthouse – building sets a new trend in eco architecture.* [Electronic resource]. – Access URL: [http://www.lightonline.ru/svet/Architecture/Green\\_LightHouse.html](http://www.lightonline.ru/svet/Architecture/Green_LightHouse.html) (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

18. *Energy-efficient house:* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.geaudit.ru/stati/energoeffektivny-dom> (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

19. *Energy-efficient house in permafrost conditions has become a reality in Yakutia:* [Electronic resource]. – Access URL: <http://energodoma.ru/>

[novosti/novosti/932-energoeffektivnyj-dom-v-usloviyakh-vechnoj-merzloty-stal-realnostyu-v-yakutii](http://energodoma.ru/novosti/novosti/932-energoeffektivnyj-dom-v-usloviyakh-vechnoj-merzloty-stal-realnostyu-v-yakutii) (date accessed: 12/05/2014). (Rus.)

20. *The first energy-efficient house opened in Altai Krai.* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/pervyi-energoeffektivnyi-dom-otkryt-v-altaiskom-krae> (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

21. *The site of the Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze / Ecodom.* [Electronic resource]. – Access URL: <http://www.itp.nsc.ru/ecodom/> (date accessed: 05/12/2014). (Rus.)

22. *V.S. Chuntonov.* Experience in design of eco house and ecovillage [Text] / V.S. Chuntonov // Scientific and Practical Conference "Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings," Institute of Thermophysics. S.S. Kutateladze, Novosibirsk, March 19-20. – 2013. – P. 23 - 31. (Rus.)

*Получено 19.08.2014*

*Received 19.08.2014*

УДК 543.27.-8

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА НАДЛИШКУ ПОВІТРЯ  
В КОТЛОАГРЕГАТАХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ  
ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ТИПУ**

**Бабак В.П.<sup>1</sup>**, член-кореспондент НАН України, **Запорожець А.О.<sup>1</sup>**, **Редько О.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03680, Україна*

<sup>2</sup>*Національний авіаційний університет, просп. Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна*

Розглянуто вплив метеорологічних параметрів на формування кількісного складу повітряного середовища та запропоновано спосіб підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря з врахуванням поточного значення концентрації кисню в повітрі.

Рассмотрено влияние метеорологических параметров на формирование количественного состава воздушной среды и предложен способ повышения точности измерения коэффициента избытка воздуха с учетом текущего значения концентрации кислорода в воздухе.

Considered the influence of meteorological parameters on the formation of the quantitative composition of air ambience. Proposed the method of improving accuracy the excess air ratio measuring taking into account the current value of oxygen concentration in the air.

Бібл. 13, табл. 3, рис. 9.

**Ключові слова:** коефіцієнт надлишку повітря, газоаналізатори, димові гази, контроль, оптимізація, вимірювання, котлоагрегати.

$[O_2]$  – поточна концентрація кисню в повітрі, %;

$[O_2]_{\text{вих}}$  – об’ємна концентрація кисню у вихідних газах, %;

$[CO]_{\text{вих}}$  – масова концентрація чадного газу у вихідних газах, мг/м<sup>3</sup>;

$[CO_2]_{\text{вих}}$  – об’ємна концентрація вуглекислого газу у вихідних газах, %;

$[NO]_{\text{вих}}$  – об’ємна концентрація монооксиду нітрогену у вихідних газах;

$E$  – парціальна густина кисню, мг/м<sup>3</sup>;

$e$  – парціальний тиск водяної пари, гПа;

$M_{O_2}$  – молярна маса кисню;

$P$  – абсолютний тиск, гПа;

$P'$  – абсолютний тиск, мм.рт.ст.;

$T$  – температура повітря, К;

$T'$  – температура повітря, °С;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;

$\phi$  – відносна вологість повітря, %;

ВЕР – вторинні енергетичні ресурси;

КНП – коефіцієнт надлишку повітря;

ГХ – градувальна характеристика;

СКВ – середньоквадратичне відхилення.

**Вступ**

Процес горіння в значній мірі визначає надійність та економічність роботи котельного агрегату. Однією з найважливіших задач в процесі експлуатації топки є регулювання процесу горіння, що забезпечує підтримку необхідної потужності та економічність роботи агрегату [1-4].

Зазвичай, головною характеристикою, що визначає економічність процесу горіння при спалюванні будь-яких видів палива в різних топкових пристроях, є коефіцієнт надлишку повітря (КНП,  $\alpha$ ). В процесі експлуатації при різних режимах формування необхідно підтримувати оптимальний КНП, при якому сума втрат

теплоти з газами і від хімічної неповноти згорання є мінімальною.

Однак, слід не тільки підтримувати КНП, але й періодично перевіряти його значення. Визначення коефіцієнта надлишку повітря, як правило, здійснюють за складом продуктів згорання, зокрема залишковою концентрацією  $O_2$  у вихідних димових газах:

$$\alpha = 1 + \frac{[O_2]_{\text{вих}}}{21 - [O_2]_{\text{вих}}}, \quad (1)$$

де  $[O_2]_{\text{вих}}$  – об’ємна концентрація кисню у вихідних димових газах.

Для оперативного контролю якості процесу горіння можуть використовуватися газоаналізатори різних типів, принцип дії більшості з яких базується на формулі (1), що констатує об'ємну концентрацію кисню в навколишньому повітрі на рівні 21 %. Проте, в ряді робіт [1-4] зазначено, що даний рівень може змінюватися в залежності від ряду параметрів: температури, тиску та вологості повітря. Таким чином, розглянутий метод визначення КНП в газоаналізаторах містить вагому систематичну похибку.

Похибка характеризує недосконалість вимірювань (що зумовлено неточністю вимірювальних приладів, неповнотою наших знань про досліджуване явище, складністю врахування всіх побічних факторів, що впливають на вимірювання), а їх позитивною характеристикою є точність. Точність це якість вимірювань, що відображає близькість їх результатів до дійсного значення вимірюваної величини. В метрології, як правило, точність характеризується побічно, через похибки вимірювання – вимірювання тим точніше, чим менша його похибка.

В даній роботі під підвищенням точності вимірювання КНП треба розуміти збільшення ступеню близькості оціненого шляхом непрямих вимірювань значення КНП з його дійсним (умовно істинним) значенням.

### Постановка завдання

Мета роботи – розглянути існуючі методи та типові газоаналізатори для контролю за складом димових газів і запропонувати спосіб підвищення точності вимірювання КНП на основі поточної концентрації кисню в повітрі.

### Аналіз існуючих методів та приладів

На даний час відомо ряд методів визначення газоподібних речовин у продуктах згорання котельних агрегатів. Вони розділяються на 3 категорії: фізичні, хімічні та фізико-хімічні (рис. 1).

Застосування механічних методів контролю газових сумішей, незважаючи на вибірковість, універсальність і простоту, є неприйнятним через невисоку точність, низьку чутливість та значний час тривалості аналізу. Діапазон застосування магнітних методів звужений до аналізу газів, що володіють парамагнітними властивостями (напр.  $O_2$ ,  $NO$ ). Теплові методи аналізу характеризуються нелінійністю градуовальної характеристики, електричною залежністю коефіцієнта теплопровідності від навколишніх умов (температури газового середовища, коливання атмосферного тиску, швидкості газообміну і т.п.), великою інерційністю. Акустичні методи базуються на вимірюванні поглинання або швидкості розповсюдження звукових та ультразвукових хвиль у газовій суміші. Даний метод не є вибірковим, і застосовується звичайно тільки для визначення  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $H_2$  в бінарних та псевдобінарних сумішах.

Таким чином, застосування класу фізичних методів є недоцільним в газовому аналізі при визначенні широкого спектру речовин (особливо при малих концентраціях).

Визначення кількісних характеристик ваговим та об'ємним методами хімічного аналізу іноді викликає труднощі, головними з яких є:

- необхідність попереднього відділення аналізованої речовини від домішок;

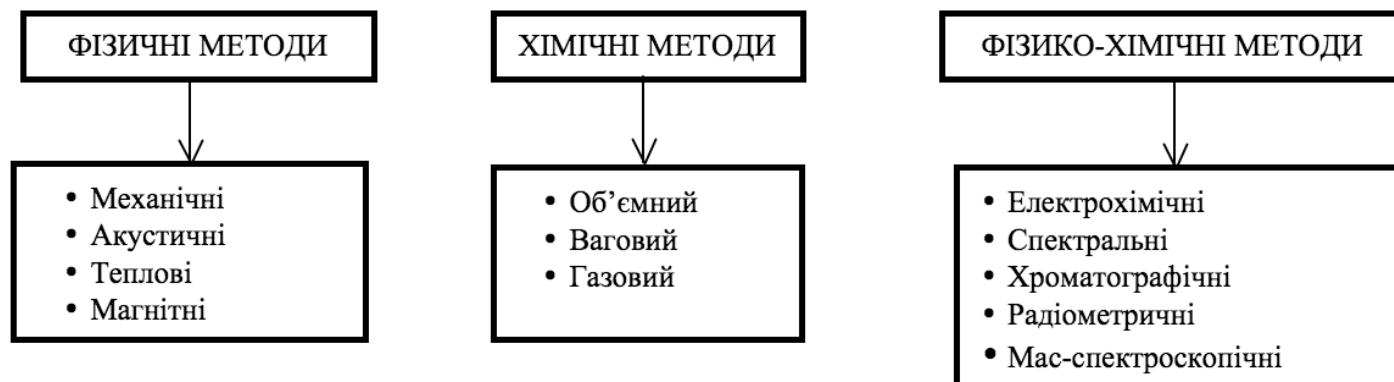


Рис. 1. Класифікація методів контролю складу газоподібних речовин.

- недостатня чутливість, що обмежує визначення малих концентрацій аналізованих речовин;
- довга тривалість аналізу (особливо у ваговому методі).

Фізико-хімічні методи (рис. 2) відрізняються підвищеною чутливістю та вибірковістю, що дозволяє використовувати їх при визначенні досить малих концентрацій досліджуваних речовин. Серед переваг таких методів також є відсутність необхідності застосування індикаторів, селективність та невеликий час аналізу проби.

Таким чином, фізико-хімічні методи відрізняються експресійністю, вибірковістю та високою чутливістю, що дозволило застосувати їх для визначення складу димових газів за допомогою газоаналізаторів.

Із великого числа електрохімічних методів аналізу газів на сьогоднішній день найбільш широко використовуються кондуктометричний, полярографічний, потенціометричний та кулонометричний.

**Кондуктометричний метод** аналізу газу базується на зміні електропровідності розчину внаслідок вибіркового поглинання ним конкретного елемента із контрольованої суміші. Під час аналізу (до і після поглинання відповідного елемента) проводиться вимірювання питомої електропровідності контрольованої суміші  $\chi$ .

Кондуктометричний аналіз характеризується необхідністю побудови градуовальної характеристики електропровідності розчину від концентрації в ньому досліджуваного газу.

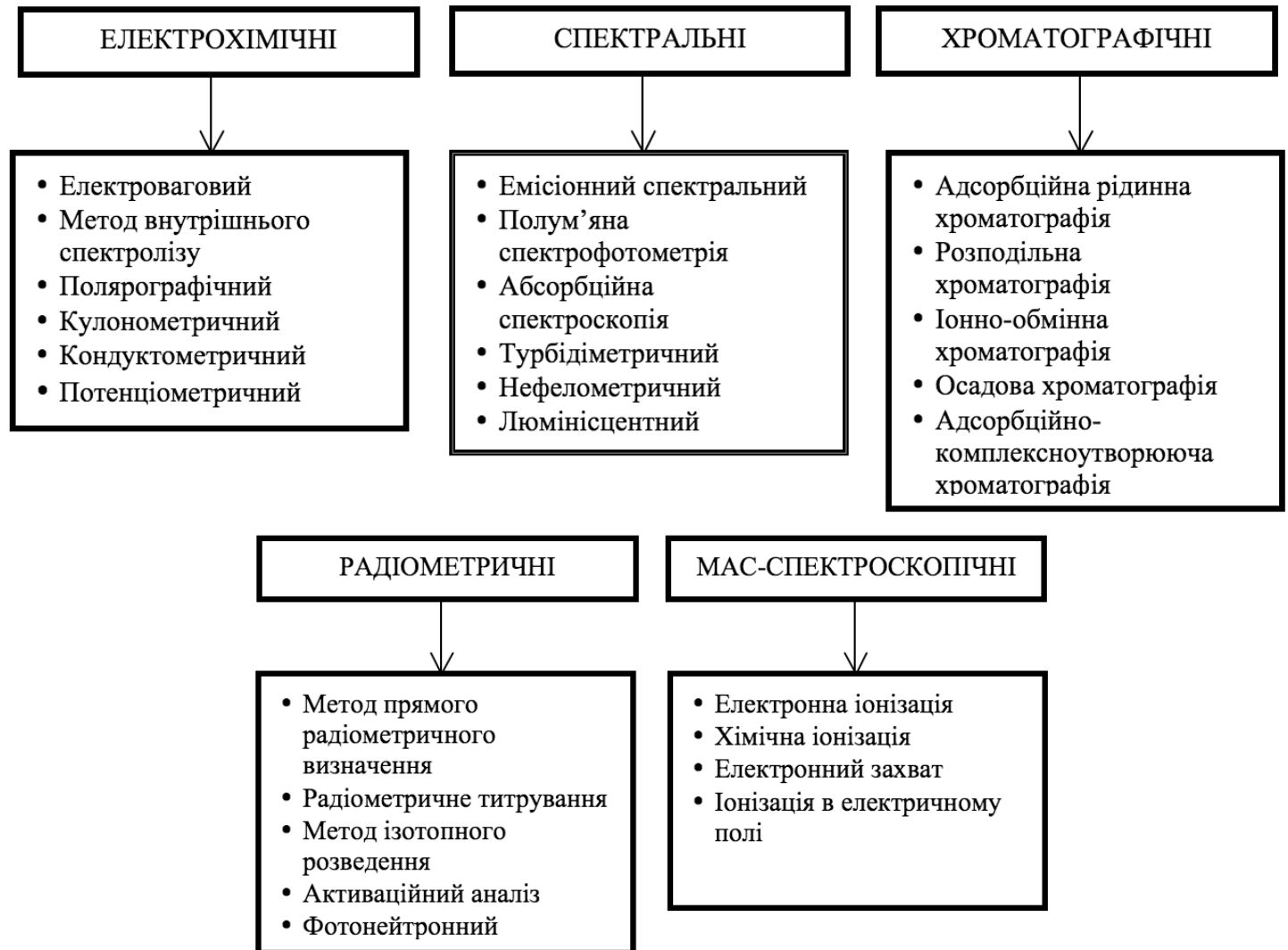


Рис. 2. Класифікація фізико-хімічних методів контролю складу газоподібних речовин.

Залежність питомої електропровідності від температури визначається рівнянням:

$$\chi(t) = \chi_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2),$$

де  $\chi_0$  – питома електропровідність розчину при  $0^\circ\text{C}$ ;  $A$ ,  $B$  – коефіцієнти, що залежать від природи електроліту та концентрації;  $t$  – температура.

З підвищенням температури електропровідність розчину збільшується, так як зменшення в'язкості розчину призводить до збільшення рухливості іонів. Підвищення ступеню дисоціації також є причиною збільшення електропровідності. Підвищення температури на  $1^\circ\text{C}$  призводить до збільшення електропровідності розчину на  $2 \dots 2,5\%$ .

Достатньо часто для аналізу газів використовують метод кондуктометричного титрування розчину аналізованої речовини. При цьому електропровідність вимірюють після додавання кожної дискретної порції титранта. Отриману залежність електропровідності розчину від кількості титранта наносять на графік – криву кондуктометричного титрування. Точка перегину кривої в координатах «електропровідність – об'єм титранта» є точкою еквівалентності.

Кондуктометричний метод аналізу є достатньо точним, швидким та об'єктивним. Відносна похибка визначення окремих електролітів цим методом складає  $\pm 1\%$ , а при титруванні – не більше  $\pm 2\%$ . Однак застосування методу обмежується тим, що електропровідність залежить від концентрації всіх наявних в розчині електролітів, що характеризує невисоку селективність кондуктометричного методу.

Точність визначення може бути збільшена, якщо електролітичну комірку помістити в термостат, а вимірювання зміни опору розчину проводити на кожній дискретній порції титранта після встановлення постійної температури.

**Полярографічний метод** базується на вимірюванні сили струму, що змінюється в залежності від напруги в процесі електролізу, в умовах, коли один електрод (катод) має достатньо малу площу поверхні, а інший (анод) навпаки більшу. Сила струму, при якому досягається повний розряд всіх іонів аналізованої речовини, що надходить до приелектродного простору внаслідок дифузії, називається граничним дифузійним

струмом. Величина цього струму пропорційна вихідній концентрації досліджуваної речовини (іонів) в розчині.

Головною відмінністю полярографічного методу є застосування індикаторного електроду в процесі електролізу. За рахунок малої площі поверхні густина струму на ньому стає порівняно великою. В результаті цього в частині розчину, що розташований поряд з таким електродом, концентрація відповідних іонів в процесі електролізу різко зменшується. Це призводить до швидкого встановлення рівноважного процесу, коли всі іони, що підходять до електроду за рахунок дифузії, розряджаються і сила струму встановлюється постійною (дифузійний струм).

Площа поверхні аноду є порівняно малою, тому поряд з електродом зміна концентрації іонів є достатньо малою, що не впливає на криву залежності сили струму від прикладеної напруги.

Сила струму (при використанні ртутного крапельного електроду) в будь-який момент часу  $t$  визначається рівнянням:

$$I(t) = 706 \cdot n \cdot D^{1/2} \cdot m^{2/3} \cdot t^{1/6} \cdot C,$$

де  $I(t)$  – сила струму,  $n$  – кількість відновлювальних/окислювальних електронів, що вступили в реакцію з іоном,  $D$  – коефіцієнт дифузії іона,  $m$  – маса ртуті, що витікає з капіляра,  $C$  – концентрація відновлювальних/окислювальних іонів.

Для одного типу іонів при однакових умовах величини  $n$ ,  $D$ ,  $m$ ,  $t$  є постійними і сила струму прямо пропорційна концентрації відновлювального іона:

$$I = K \cdot C.$$

Ця залежність є основою кількісного полярографічного аналізу: знаючи величину сили струму можна визначити концентрацію відновлювального іона.

На сьогоднішній день широкого розповсюдження набула полярографія на твердих електродах, що обумовлено рядом переваг даного методу:

- робота в області позитивних потенціалів, де застосування ртутних крапельних електродів обмежено у зв'язку з анодним розчиненням ртуті;
- застосування загущених/твердих електролітів та підбору металу електроду у відповідності з особливостями визначення конкретного типу газу;

• безперервний аналіз потоку контрольованої величини.

Сила струму на стаціонарному твердому електроді визначається рівнянням:

$$I = F \cdot D \cdot S \cdot n \cdot \frac{C_s - C_0}{\delta}, \quad (2)$$

де  $F$  – число Фарадея,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $S$  – площа поверхні електроду;  $n$  – число електронів, що прийняли участь в реакції,  $C_s$  – молярна концентрація речовини у розчині,  $C_0$  – молярна концентрація речовини біля поверхні електроду,  $\delta$  – товщина дифузійного шару.

Газоаналізатори, що працюють на основі полярографічних методів, застосовують для визначення газів, з окислювально-відновлювальними властивостями ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ), при цьому точність класичної полярографії складає  $\pm 2 \dots 3$  %. Також серед переваг методу – вибірковість та висока чутливість.

**Потенціометричний метод** заснований на вимірюванні потенціалу індикаторного електроду, зануреного в аналізований розчин, що змінюється в результаті хімічних реакцій та залежить від температури та концентрації розчину. Потенціал індикаторного електроду вимірюється за допомогою порівняльного електроду. Під час вимірювання різниці потенціалів струм, що проходить через комірку, повинен мати достатньо невеликі значення (в діапазоні  $10^{-6} \dots 10^{-14}$  А), щоб електроди не поляризувались.

Потенціали електроду, що відповідають окисно-відновній рівновазі, є функціями активності речовин, що беруть участь в процесі переносу електронів. Ці залежності описуються за допомогою рівняння (2).

Розрізняють пряму потенціометрію та потенціометричне титрування.

Перший метод допускає вимірювання абсолютного та точного значення електродного потенціалу, за допомогою якого можна встановити активність потенціального іона в розчині. Найбільш важливе значення даний метод має при визначенні активності іонів водню ( $a_{\text{H}^+}$ ), чи рН розчинів ( $\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+}$ ). Визначення активності інших потенційних іонів представляє широкий інтерес для розрахунку термодинамічних констант хімічної та електрохімічної рівноваги.

Розчинність більшості газів, таких як  $\text{SO}_2$ ,

$\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$  та інших, невеликі їх концентрації в розбавлених розчинах електролітів дуже близькі до активностей, тому для визначення цих газів використовують прямий потенціометричний метод.

При потенціометричному титруванні в точці еквівалентності, коли концентрація досліджуваного газу стає незначною, різка зміна потенціалу індикаторного електроду свідчить про необхідність закінчення титрування. Метод потенціометричного титрування більш чутливий, та виключає суб'єктивну похибку, що виникає при візуальному знаходженні моменту завершення титрування.

**Кулонометричний метод.** Застосування даного методу аналізу засновано на повному електроокисленні чи електровідновленні електрохімічно активної досліджуваної речовини. При цьому фіксують загальну кількість струму, необхідної для електрохімічного перетворення досліджуваної речовини. По отриманим даним визначається кількість речовини, що піддалася перетворенню, та обчислюється її концентрація.

В основу кулонометрії покладено закон Фарадея:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{F \cdot n},$$

де  $m$  – маса електрохімічно перетвореної речовини,  $M$  – мольна маса досліджуваної речовини,  $I$  – сила струму при електролізі,  $t$  – час електролізу,  $F$  – число Фарадея,  $n$  – число електронів, що беруть участь в окисненні/відновленні одного іона.

Для здійснення кулонометричного аналізу необхідно, щоб вихід по струму досліджуваної речовини становив 100 %, тобто весь струм, що протікає через комірку, має витратитися на електрохімічну реакцію за участі досліджуваної речовини. Основною вимогою здійснення кулонометрії є необхідність виключення побічних реакцій (хімічних та електрохімічних) за участі контрольованого зразка, інакше в результаті аналізу буде внесена похибка.

В таблиці № 1 наведена порівняльна характеристика розглянутих методів при визначенні основних компонентів димових газів котельної установки та супутніх газів.

В результаті порівняння визначено, що найбільш інформативними методами при контролі

Табл. 1. Порівняльна характеристика електрохімічних методів аналізу димових газів

Метод Газ	Кондуктометричний	Полярграфічний	Потенціометричний	Кулонометричний
Водень (H <sub>2</sub> )	+	+	–	+
Монооксид вуглецю (CO)	+	+	–	–
Діоксид вуглецю (CO <sub>2</sub> )	+	–	+	+
Вуглеводні (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> O <sub>z</sub> )	+	+	–	+
Оксиди азоту (NO <sub>x</sub> )	–	+	+	–
Кисень (O <sub>2</sub> )	+	+	–	–
Озон (O <sub>3</sub> )	–	+	–	+
Оксиди сульфуру (SO <sub>x</sub> )	+	+	+	+
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	+	+	–	+
Фтор (F <sub>2</sub> )	+	–	+	+

за складом димових газів котельної установки є кондуктометричний та полярграфічний методи (8 із 10 аналітичних параметрів). При цьому важливим є їх симбіоз, оскільки кондуктометричний метод не дозволяє виміряти концентрацію NO<sub>x</sub>, а полярграфічний – CO<sub>2</sub>. Врахування цих величин є необхідним фактором при режимно-налагоджуваних роботах та комплексних екологічно-теплотехнічних випробувань котельних агрегатів.

Принцип дії електрохімічних газоаналізаторів заснований на залежності між параметрами електрохімічної системи та складом аналізованої суміші, що надходить до цієї системи. Серед недоліків таких приладів – низька селективність, обмежена швидкодія, недовговічність електрохімічного сенсора. Перевагами електрохімічних газоаналізаторів є широка номенклатура контролюючих газів, можливість вимірювання наднизьких концентрацій досліджуваних

Табл. 2. Порівняльна характеристика сучасних портативних газоаналізаторів електрохімічного типу

Тип	Контрольовані речовини	Особливості	Час підготовки проби, с	Країна виробник	Ціна, \$
ПГА-300	O <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• можливість індивідуального збирання приладу</li> <li>• невеликі габарити</li> <li>• вибухозахисна форма</li> </ul>	30	Росія	від 933
МОНОЛИТ-2	O <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• захист від вибуху</li> <li>• розширений температурний діапазон експлуатації</li> <li>• сигналізація</li> <li>• статистична обробка результатів</li> <li>• документування результатів</li> <li>• пам'ять даних</li> </ul>	—	Росія	від 1460

TESTO-330	O <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оснащений зондом пошуку витоку</li> <li>• пам'ять на 200 вимірювань</li> <li>• USB-інтерфейс для синхронізації з ПК</li> </ul>	60	Німеччина	від 1290
TESTO-350	O <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• розширений температурний діапазон експлуатації</li> <li>• висока точність вимірювання низьких концентрацій NO та CO</li> <li>• вбудований принтер</li> </ul>	60	Німеччина	від 4760
ОКА-Т	CO, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• можливість одночасного підключення до 4-х каналів невеликі габарити та вага</li> </ul>	90	Росія	—
Полар-2	O <sub>2</sub> , CO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• пам'ять на 990 вимірювань</li> <li>• вбудований принтер</li> <li>• USB-інтерфейс для синхронізації з ПК</li> <li>• тривалість роботи без підзарядки – до 16 год.</li> </ul>	—	Росія	—
АНКАТ-7361	NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, Cl <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• тривалість роботи без підзарядки – до 34 год.</li> <li>• невеликі габарити та вага</li> </ul>	180	Росія	від 370

газів, порівняно низька ціна. В таблиці 2 приведено аналіз сучасних портативних газоаналізаторів, що використовуються для визначення якісного та кількісного складу димових газів.

**Кліматичні характеристики середовища.** Повітря – це природна суміш газів, що на 98...

99 % складається з азоту і кисню, а також вуглекислого газу, води, водню, інертних газів та ін. (табл. 3). В промисловості та побуті повітряний кисень використовується в процесах згорання палива, при цьому його концентрація є одним з найважливіших параметрів при оптимізації про-

Табл. 3. Склад повітря

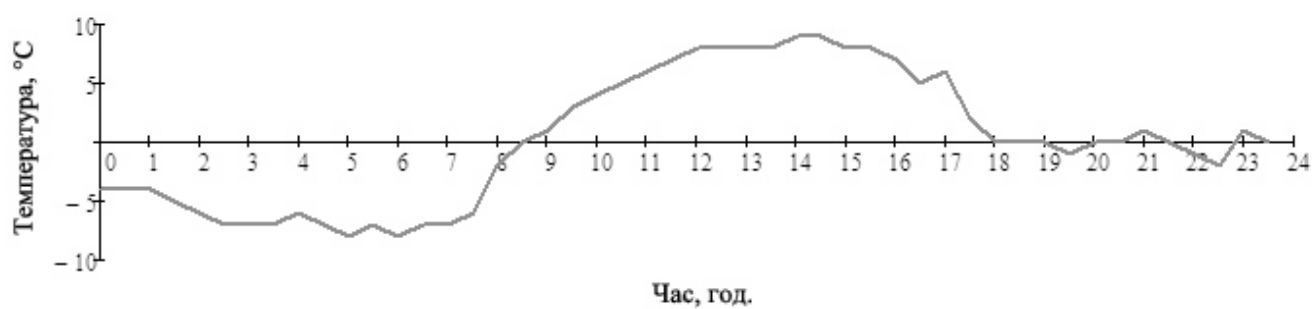
Компонент	Позначення	Об'ємна концентрація, %	Масова концентрація, %
Азот	N <sub>2</sub>	78,084	75,50
Кисень	O <sub>2</sub>	20,948	23,15
Аргон	Ar	0,934	1,29
Вуглекислий газ	CO <sub>2</sub>	31,4×10 <sup>-3</sup>	4,6×10 <sup>-2</sup>
Неон	Ne	18,18×10 <sup>-4</sup>	1,4×10 <sup>-3</sup>
Метан	CH <sub>4</sub>	2×10 <sup>-4</sup>	8,4×10 <sup>-5</sup>
Гелій	He	5,24×10 <sup>-4</sup>	7,3×10 <sup>-5</sup>
Криптон	Kr	1,14×10 <sup>-4</sup>	3×10 <sup>-3</sup>
Водень	H <sub>2</sub>	5×10 <sup>-5</sup>	8×10 <sup>-5</sup>
Ксенон	Xe	8,7×10 <sup>-6</sup>	4×10 <sup>-5</sup>

цесу горіння.

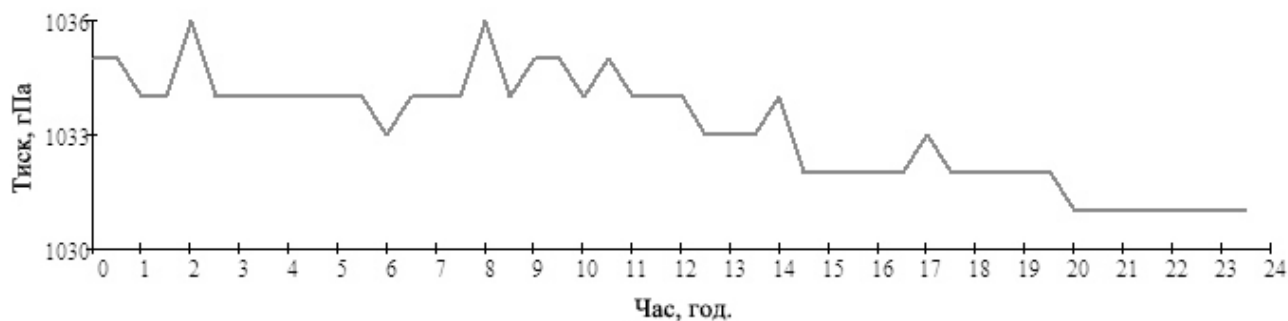
Традиційно при розрахунку КНП рівень об'ємної концентрації кисню в повітрі складає 21 %. Проте багаторічні кліматофізіологічні дослідження дозволили не тільки спростувати твердження про стабільність концентрації кисню на рівнинах, але й запропонувати новий параметр кисню, що входить до складу повітря – парціальну густину кисню. В роботі [5] описується визначений парадокс, що полягає в помилковості трактування закону Дальтона: постійність процентного співвідношення газів повітря сприй-

мається за постійність абсолютної кількості газів повітря, в тому числі і кисню.

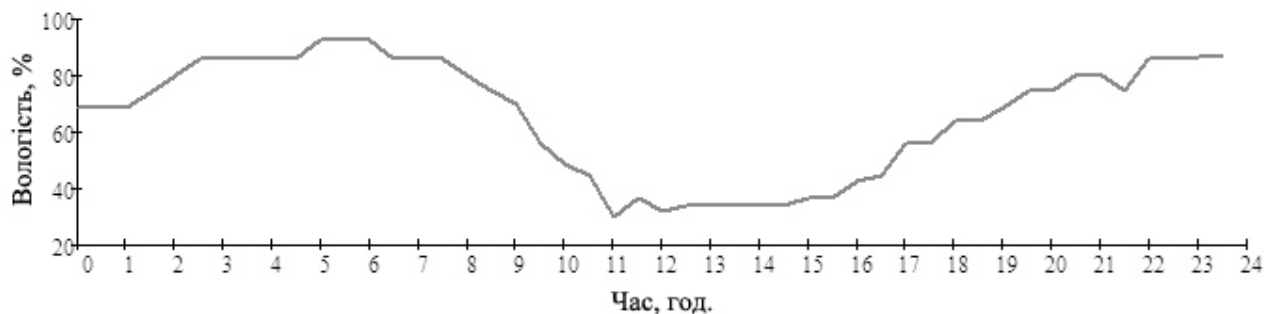
В результаті цих досліджень встановлено зміну парціальної густини кисню в повітрі на рівнинах. Вона полягає в тому, що при добовій (сезонній) динаміці та коливаннях основних метеорологічних характеристик (температури, абсолютної вологості повітря, абсолютного атмосферного тиску), обумовлених динамікою атмосферних процесів, відбувається перерозподіл у часі і просторі парціальної густини кисню в повітрі, що проявляється в добовій (сезонній)



а)

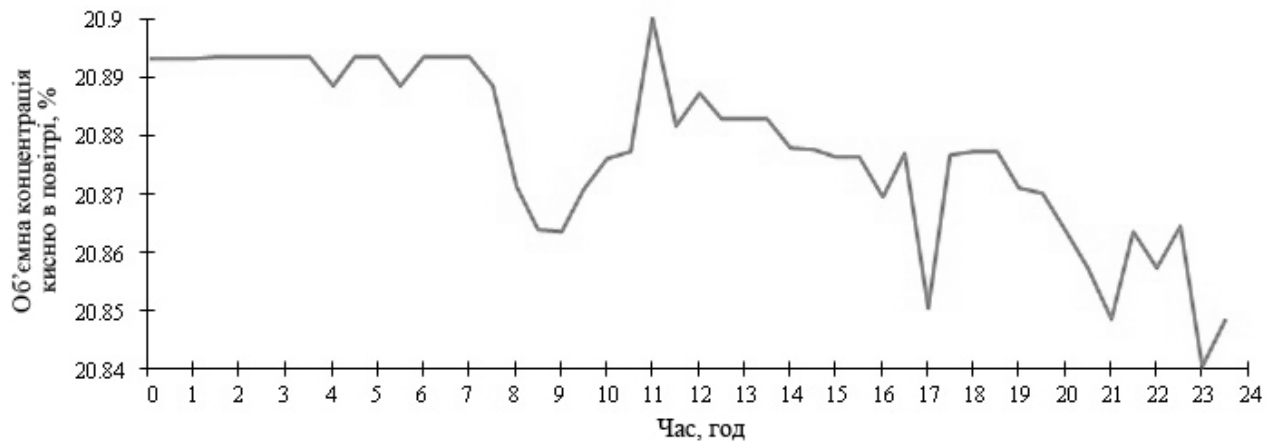


б)



в)

Рис. 3. Залежність зміни основних метеорологічних характеристик від тривалості доби в Києві станом на 28 жовтня 2014 року: а) температури; б) тиску; в) вологості.



**Рис. 4.** Зміна об'ємної концентрації кисню в повітрі в залежності від тривалості доби в Києві станом на 28 жовтня 2014 року.

періодичності та погодних аномаліях (рис. 3, 4).

Аналітичне значення парціальної густини кисню ( $E$ , г/м<sup>3</sup>) прямо пропорційне атмосферному тиску ( $P$ , гПа) за виключенням парціального тиску водяної пари ( $e$ , гПа) і обернено пропорційно температурі повітря ( $T$ , К) (3):

$$E = 0,2315 \cdot 10^6 \cdot \frac{(P - e)}{R \cdot T}, \quad (3)$$

де  $R$  – питома газова стала для сухого повітря за тиску вираженого в гПа.

При цьому парціальний тиск водяної пари:

$$e = \varphi p_{\text{нас}},$$

де  $\varphi$  – вологість повітря, а  $p_{\text{нас}}$  – обчислюється згідно рекомендацій Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [6]:

$$p_{\text{нас}}(P, T') = f(P) \cdot r(T');$$

$$f(P) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} P - 0,074 \cdot P^{-1};$$

$$r(T') = 6,112 \cdot e^{\frac{17,62T'}{243,12+T'}},$$

де  $T'$  – температура повітря в градусах Цельсія, °С.

Перехід до об'ємної концентрації кисню проходив за наступним співвідношенням [7, с. 894]:

$$[O_2] = \frac{6,236 \cdot E \cdot T}{P' \cdot M_{O_2}},$$

де  $P'$  – атмосферний тиск в мм.рт.ст.,  $M_{O_2}$  – молярна маса кисню.

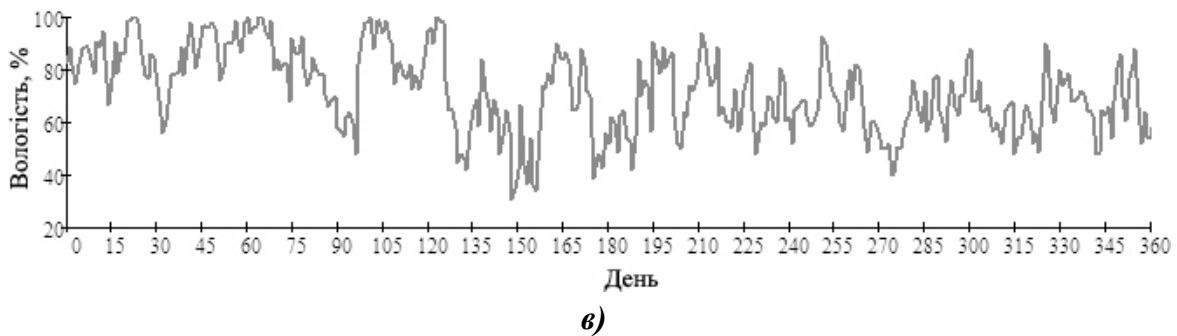
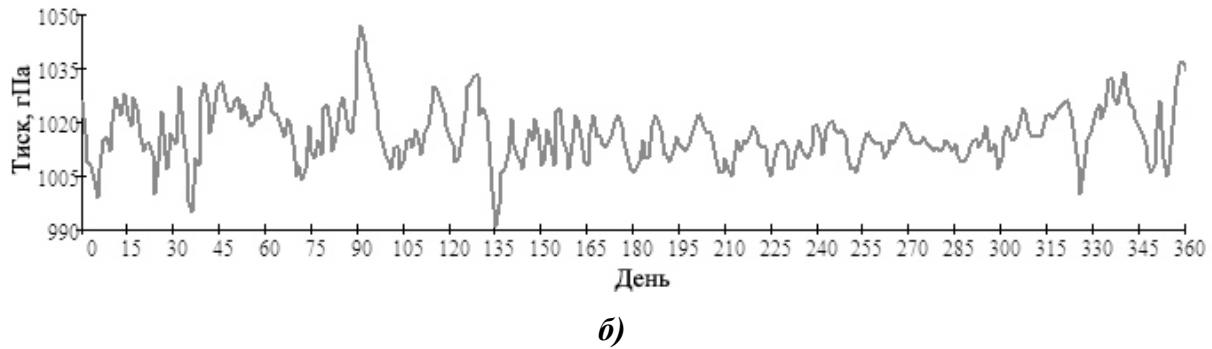
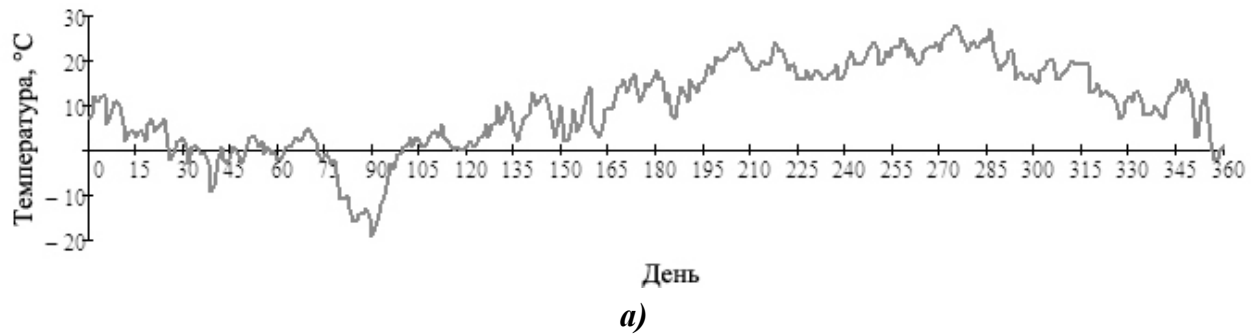
Таким чином кінцевий аналітичний вигляд для розрахунку об'ємної концентрації кисню в повітрі має вигляд:

$$[O_2](P, T', \varphi) = 20,957 \cdot \left(1 - \frac{e(P, T', \varphi)}{P}\right).$$

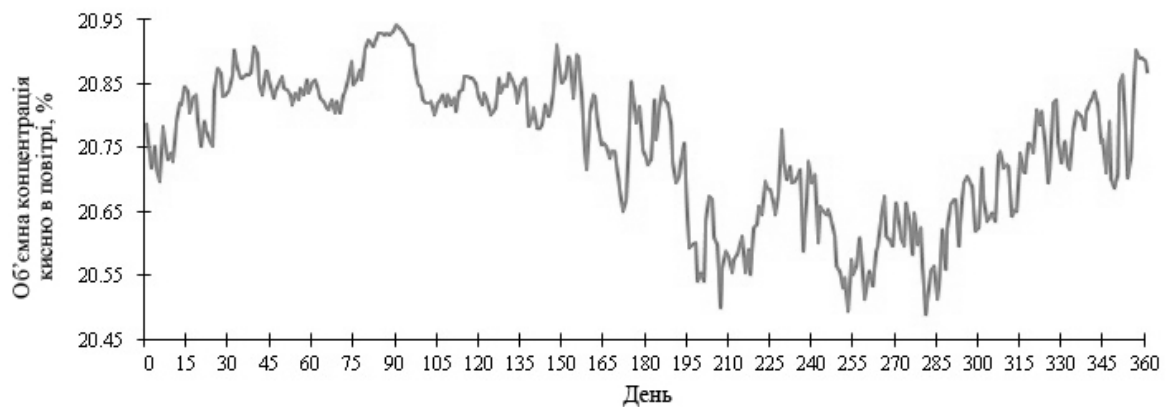
В рамках дослідження також проаналізовані зміни головних метеорологічних параметрів (температури, тиску, вологості) на протязі одного року (листопад 2013 р. – жовтень 2014) в м. Києві (рис. 5) та отримана сезонна зміна об'ємної концентрації кисню в повітрі на даній території (рис. 6).

В Інституті технічної теплофізики НАН України було проведено експериментальне дослідження роботи водогрійного котла із використанням газоаналізатору rbr-ECOM-KD. Результатами 11 вимірювань газоаналізатором з датчиком електрохімічного типу слугували значення коефіцієнту надлишку повітря ( $\alpha$ ), концентрації кисню ( $O_2$ ), вуглекислого газу ( $CO_2$ ), чадного газу ( $CO$ ), монооксиду нітрогену ( $NO$ ). Перед запуском котла газоаналізатором було проведено вимірювання характеристик повітря, що подається до топки; встановлено значення об'ємної концентрації кисню в повітрі на рівні 20,3 % (при цьому допускається факт неповного очищення газоаналізуючих трактів).

В матеріалах, що описують залежність КНП,



**Рис. 5. Залежність зміни основних метеорологічних характеристик від пори року в Києві станом на період листопад 2013 р. – жовтень 2014 р.: а) температури; б) тиску; в) вологості.**



**Рис. 6. Сезонна зміна об'ємної концентрації кисню в повітрі на території Києва в період з листопада 2013 р. – жовтень 2014 р.**

та паспорті на газоаналізатор [8] за замовчуванням приймається значення об'ємної концентрації кисню в повітрі рівним 21,0 % (1). Згідно з вищенаведеною інформацією про добуву/сезону зміну значення концентрації кисню в повітрі, при розрахунку коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  маємо справу з невилученою складовою систематичної похибки, зумовленою використанням наближених значень. Далі, при визначенні значення КНП, пропонується вводити поправки для компенсації похибки методу вимірювання.

На рис. 7 суцільною лінією представлено залежність концентрації кисню у відсотках від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  за оберненою формулою (4), коефіцієнт кореляції – 0,997. Пунктирними лініями зображено довірчий інтервал. Розширена невизначеність складає 0,12 % кисню (6). За паспортними даними на електрохімічний датчик, похибка визначення концентрації газів складає 5 % виміряної величини (в нашому випадку це складає від 0,04 % до 0,24 % об'ємної концентрації кисню у вихідних газах). Точками позначені експериментальні дані, хрестиками – розраховані значення КНП при концентрації кисню в повітрі 20,3 %. Середньоквадратичне відхилення КНП, виданих газоаналізатором, від КНП за концентрації кисню в повітрі 20,3 % склало 0,09.

$$[O_2]_{вих}(\alpha) = 21 \cdot (\alpha - 1) / \alpha, \quad (4)$$

де  $[O_2]_{вих}(\alpha)$  – функція залежності об'ємної концентрації кисню у вихідних газах від КНП.

Для визначення довірчого інтервалу [9] спочатку оцінювалось стандартне відхилення  $s$  виміряних значень від оберненої теоретичної залежності (3).

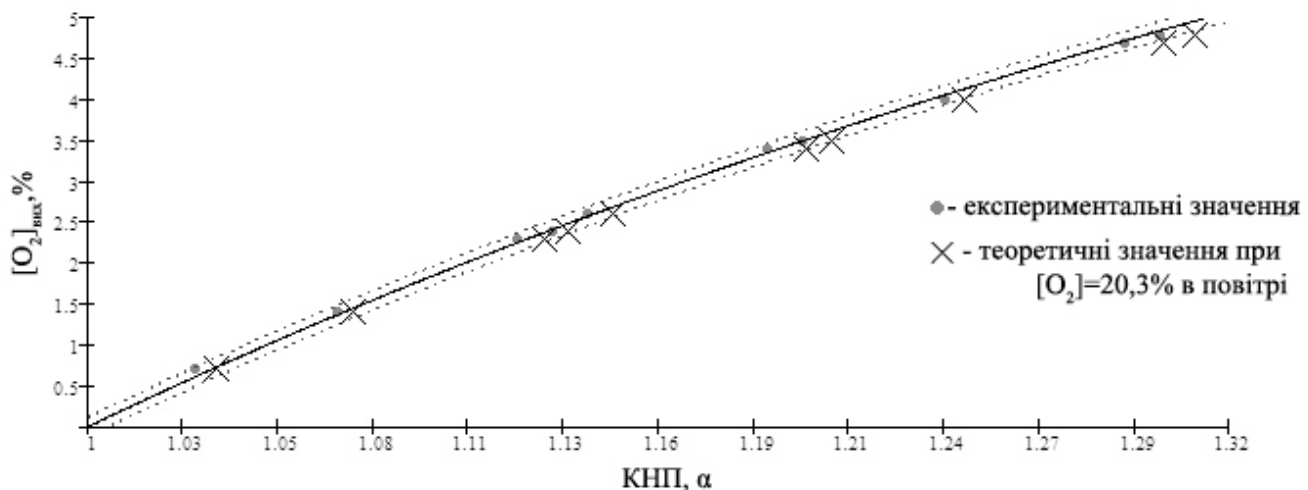
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} ([O_2]_{вих_i} - [O_2]_{вих}(\alpha_i))^2}, \quad (5)$$

де  $[O_2]_{вих_i}$  – експериментально виміряні газоаналізатором значення об'ємної концентрації кисню,  $[O_2]_{вих}(\alpha_i)$  – значення концентрації повітря у вихідних газах (%) за формулою (3) при визначених газоаналізатором КНП,  $n$  – кількість проведених вимірювань.

За отриманими значеннями СКВ похибки побудови градуальної характеристики (ГХ)  $S_{[O_2]_{вих}}(\alpha)$  оцінювався довірчий інтервал випадкової похибки ГХ  $\Delta([O_2]_{вих})$  (розширена невизначеність  $U([O_2]_{вих})$ ) індивідуального значення  $[O_2]_{вих_i}$ :

$$\Delta([O_2]_{вих}) = U([O_2]_{вих}) = t_{(1-P)/2}(v) \cdot S_{[O_2]_{вих}}(\alpha), \quad (6)$$

де  $t_{(1-P)/2}$  – квантиль розподілу Стюдента, для довірчої імовірності  $P = 0,95$  та  $v = n - 2$  ступеней свободи.



**Рис. 7. Залежність об'ємної концентрації кисню у вихідних газах від КНП із довірчими інтервалами (точками позначені експериментальні дані об'ємної концентрації кисню у вихідних газах, хрестиками – розраховані значення КНП за об'ємної концентрації кисню в повітрі 20,3 %).**

Для побудови ГХ важливим є оптимальний вибір математичної моделі функції апроксимації [10]. Для визначення залежності значень концентрацій компонентів вихідних газів від КНП застосована поліноміальна нелінійна регресія (поліноми Чебишева) [11]. Було розраховано залежність об'ємної концентрації вуглекислого газу (7) з коефіцієнтом кореляції – 0,995 (рис. 8, а), масової концентрації чадного газу (8) з коефіцієнтом кореляції – 0,71 (рис. 8, б) та масової концентрації монооксиду нітрогену (9) з коефіцієнтом кореляції – 0,82 (рис. 8, в).

Статистична обробка даних проводилась в програмному пакеті MathCAD [12].

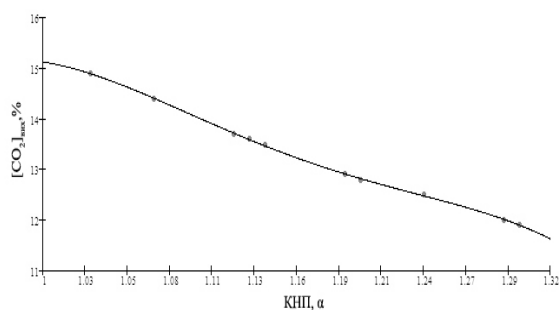
$$[\text{CO}_2]_{\text{вих}}(\alpha) = -1582 + 5583 \cdot \alpha - 7269 \cdot \alpha^2 + 4181 \cdot \alpha^3 - 898,4; \quad (7)$$

$$[\text{CO}]_{\text{вих}}(\alpha) = 456632,9 - 1114000,4 \cdot \alpha + 905420,4 \cdot \alpha^2 - 245044,4 \cdot \alpha^3; \quad (8)$$

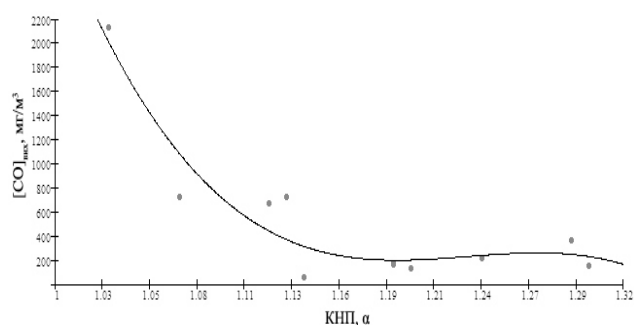
$$[\text{NO}]_{\text{вих}}(\alpha) = -1502,3 + 4249,1 \cdot \alpha - 3776 \cdot \alpha^2 + 1099,2 \cdot \alpha^3; \quad (9)$$

Дані залежності та значення коефіцієнтів кореляції, показують, що за розрахунковими інтерполянтами, на основі обчисленого КНП, за об'ємною концентрацією кисню у вихідних газах та у повітрі, можна прогнозувати значення концентрацій компонентів вихідного газу. Звісно, розраховані рівняння за малого обсягу вимірювальної інформації, не дають достатньої точності. Тому даний підхід, для свого підтвердження, потребує планованого експерименту із більшою кількістю вимірювань з багатократними спостереженнями.

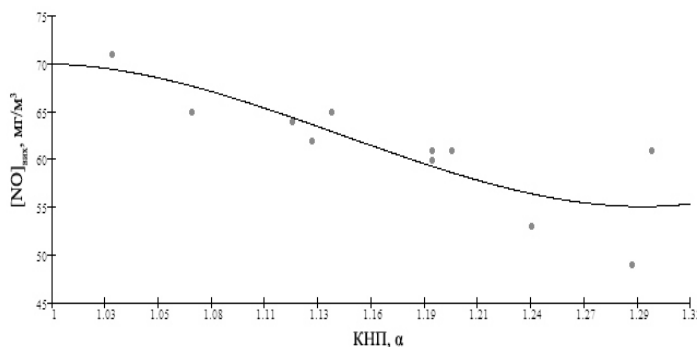
Беручи до уваги наведені вище дані про концентрацію кисню в повітрі, актуальним є завдання врахування добової/сезонної зміни кліматичних параметрів середовища та умов експлуатації при проведенні контролю процесу горіння. Тому, ми рекомендуємо враховувати поправку на поточне значення об'ємної концентрації кисню в повітрі шляхом введення зворотнього зв'язку в блок обчислення КНП газоаналізатору. На рис. 9 відображено двохпараметричну залежність поправки (абсолютної мето-



а)

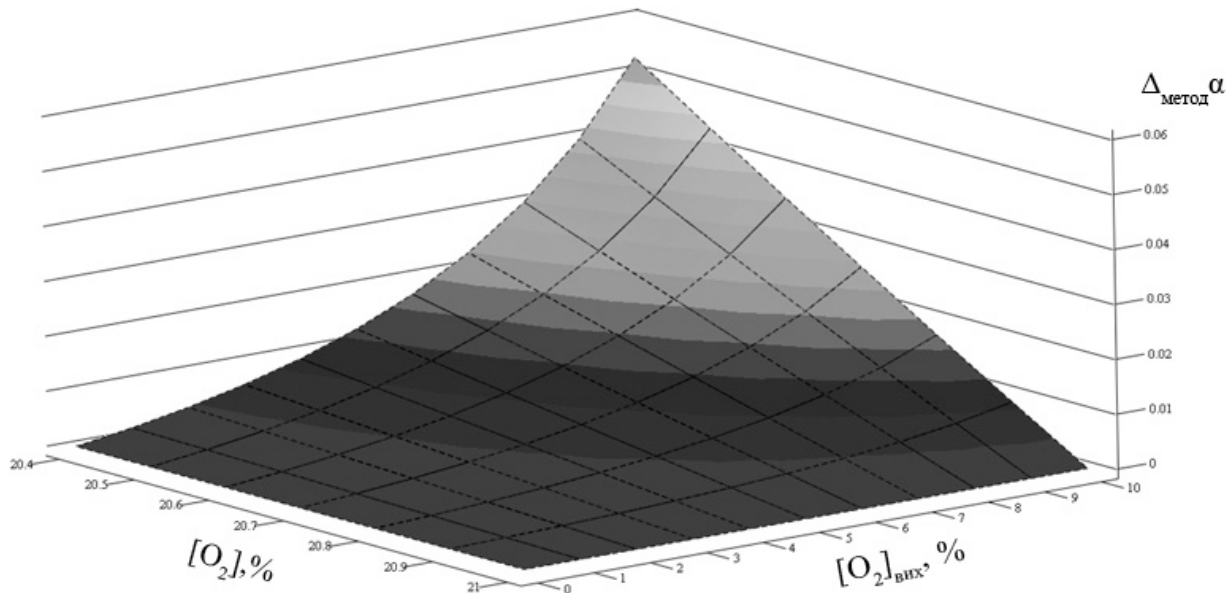


б)



в)

**Рис. 8. Залежності концентрацій компонентів продуктів горіння від КНП: а – вуглекислий газ; б – чадний газ; в – монооксид нітрогену.**



**Рис. 9.** Двохпараметрична залежність поправки (абсолютної методичної похибки визначення КНП) від об'ємної концентрації кисню в повітрі та об'ємної концентрації кисню у вихідних газах.

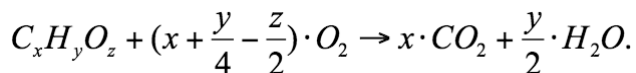
дичної похибки визначення КНП) від її аргументів, яка обчислюється наступним чином:

$$\Delta_{\text{метод}} \alpha([O_2], [O_2]_{\text{вих}}) = \frac{[O_2]_{\text{вих}} \cdot (21 - [O_2])}{([O_2] - [O_2]_{\text{вих}}) \cdot (21 - [O_2]_{\text{вих}})} \quad (10)$$

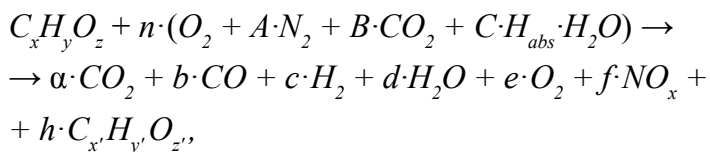
В роботі [13] було запропоновано формулу розрахунку КНП на основі коефіцієнтів балансу наближеної до реальної реакції горіння палива:

$$\alpha = \frac{n}{x + y/4 - z/2},$$

де параметри  $n$ ,  $x$ ,  $y$  та  $z$  визначаються з рівняння ідеальної реакції горіння:



Однак реальна реакція горіння містить набагато більше складових, що обумовлено характерним складом повітря та палива:



де  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – відповідні концентрації азоту, вуглекислого газу та води;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $h$  – коефіцієнти врівноваження вихідних сполук.

В подальших дослідженнях методів підвищення точності визначення КНП та концентрацій компонентів вихідного газу планується описати коефіцієнти балансу реакції горіння вуглеводних речовин. При наявності інформації про якісний та кількісний склад палива і повітря, коефіцієнтів рівняння реакції горіння, створюються умови для планового експерименту, метою якого є створення математичної моделі оптимального режиму експлуатації котлоагрегатів.

### Висновки

Споживання паливно-енергетичних ресурсів на промислових підприємствах та в сфері ЖКГ становить істотну частку собівартості виробленої продукції, тому в даний час актуальним є використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР). В якості ВЕР металургійного виробництва можуть виступати доменний, коксовий газ та інші види ресурсів. В якості ВЕР ЖКГ – тверде паливо, генераторний газ та ін. Утилізація ВЕР дає значний енергозберігаючий ефект, оскільки дозволяє економити використання основного палива – природного газу.

Проблема економії паливних ресурсів на сьогоднішній день є актуальною не тільки для України, а й всього світу, тому контроль за процесами горіння в котлоагрегатах має бути мак-

симально точним. Запропонований метод підвищення точності вимірювання КНП в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електродного типу має надзвичайну перспективність, оскільки враховує методичну похибку вимірювання, що закладена в електронну систему обчислення пристроїв. Для визначення КНП газоаналізатору необхідно визначити поточну об'ємну концентрацію кисню в димових газах та порівняти її зі значенням об'ємної концентрації кисню в повітрі, яка вважається рівною 21 % (1). Однак даний параметр не є константою, і залежить не тільки від висоти розташування об'єкта контролю, але й від таких параметрів як вологість і температура повітря, та атмосферний тиск.

Кінцева формула для визначення КНП з врахуванням поточної концентрації кисню в повітрі має вигляд:

$$\alpha = 1 + \frac{[\text{O}_2]_{\text{вих}}}{[\text{O}_2] - [\text{O}_2]_{\text{вих}}}$$

Таким чином, введення зворотнього зв'язку в систему газоаналізатора по визначенню поточної об'ємної концентрації кисню в повітрі дозволить підвищити точність вимірювання КНП (до 5 %).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерук В.Ю. Огляд методів контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудат'єв // Збірник наукових праць ОДАТРА. – 2013. – №1. – С. 51 – 55.
2. Воликов А.Н. Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах / А.Н. Воликов, О.Н. Новиков, А.Н. Окадьев // Энергоназор-информ. – 2010. – №1. – С. 54 – 57.
3. Ночвай В.М. Метод контролю витрат кисню пальників по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану / В.М. Ночвай // Вісник ЖДТУ. – 2012. – №2. – С. 48 – 52.
4. Скоробогатова И.В. Пути повышения эффективности использования топлива при реше-

нии задач автоматического управления / И.В. Скоробогатова, С.В. Неежмаков, Б.В. Гавриленко // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – №21(183). – С. 48 – 54.

5. *Методика расчета количества кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров с целью прогнозирования метеопатических эффектов атмосферы* [Текст]: (метод. рекомендации) / Гл. упр. лечеб.-профилактич. помощи; сост. В. Ф. Овчарова. – М.: МЗ СССР. – 1983. – 13 с.

6. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* / World Meteorological Organization, 2008. – №8. – 119 p.

7. *Новый справочник химика и технолога. Аналитическая химия. Ч.1.* – С.-Пб.: АНО НПО «Мир и Семья», 2002. – 964 с.

8. *Bedienungsanleitung ECOM®KD. Kreative Technikausdem Hauserbr.* – rbr Messtechnik GmbH, 2007 – P. 41 – 43.

9. *Игуменцева Н.В. Статистический анализ результатов эксперимента и наблюдений* / Н.В. Игуменцева, В.И. Пахомов. – Харьков: ООО «Компания Смит», 2005 г. – С. 129 – 138.

10. *Рекомендация по метрологии. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. Оценивание погрешностей.* МИ 2175-91. – С.-Пб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1997 – С. 3 – 15.

11. *Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика (для инженерных и научных работников)* / А.И. Кобзарь // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – С. 681 – 691.

12. *Плис А.И. MathCad: Практический практикум для экономистов и инженеров* / А.И. Плис, Н.А. Сливина. – М.: Финансы и статистика, 1999. – С. 538 – 548.

13. *William M. Silvis. The Algorithmic Structure of the Air/Fuel Ratio Calculation* / Silvis M. William // Readout. – 1997. – №15. – P. 17 – 24.

**INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING THE AIR EXCESS COEFFICIENT IN THE BOILERS USING THE ELECTROCHEMICAL GAS ANALYZER**

**Babak V.P.<sup>1</sup>, Zaporozhets A.O.<sup>1</sup>, Redko O.O.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics NAN of Ukraine, Zhelyabov str., 2a, Kiev. 03680, Ukraine

<sup>2</sup>National Aviation University, Komarov Ave., 1, Kiev, 03680, Ukraine

In this article the features of definition an air excess coefficient in boilers are investigated. The objective of the work is consider the exciting methods and typical gas analyzers for monitoring the flue gas composition and propose the method to improve the accuracy of measuring the air excess coefficient. Analyzed and generated the classification of exciting methods for monitoring gaseous substances in the flue gases. Comparative characterization of electrochemical analytical methods and modern portable gas analyzers are showed. Described the advantages of conductometric and polarographic techniques of physicochemical analytical methods. Considered the dependence of oxygen partial density changing from the main meteorological characteristics – temperature, humidity and atmospheric pressure. Set the seasonal changes of oxygen volume concentration in the air (Kiev, Ukraine) based on experimental data. Considered the traditional method of calculating the air excess coefficient in the gas analyzer and suggested the way to improve its accuracy based on the current value of the oxygen concentration in the air. Submitted 2-parametric correction dependence (absolute error measurement method) of air excess coefficient from oxygen partial density in the air and oxygen concentration in the initial gas of combustion process. Based on the experimental results proposed to use the component concentration of exhaust gases as additional information parameters for the calculation of air excess coefficient.

References 13, tables 3, figures 9.

**Key words:** excess air ratio, gas analyzers, flue gases, control, optimization, measurement, boilers.

1. *Kucheruk V.Ju.* Review of methods of controlling the composition of flue gas boiler installations / V.Ju. Kucheruk, I.A. Dudat'ev // Scientific Papers of ODATRJa. – 2013. – №1. – P. 51 – 55. (Ukr.)

2. *Volikov A.N.* Improving the efficiency of

fuel combustion in boilers / A.N. Volikov, O.N. Novikov, A.N. Okat'ev // Jenergonadzor-inform. – 2010. – №1. – P. 54 – 57. (Rus.)

3. *Nochvaj V.M.* The method of consumption monitoring oxygen flow to the burner flame radiation by burning propane-butane / V.M. Nochvaj // Bulletin of ZhDTU. – 2012. – №2. – P. 48 – 52. (Ukr.)

4. *Skorobogatova I.V.* The way improve fuel efficiency in solving the problems of automatic control / I.V. Skorobogatova, S.V. Neezhmakov, B.V. Gavrilenko // Scientific Papers of DonNTU. – 2011. – №21(183). – P. 48 – 54.

5. *Method of calculating the amount of oxygen in the atmosphere based on meteorological parameters in order to predict the meteopathic effects of the atmosphere [Text]: (method. recommendations) / General Directorate of therapeutic and prev. care; comp. V. F. Ovcharova. – M.: MZ USSR. – 1983. – 13 p. (Rus.)*

6. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation / World Meteorological Organization, 2008. – №8.– 119 p.*

7. *The new directory chemist and technologist. Analytical chemistry. Ch.1. – S.-Pb.: ANO NPO «World and Family», 2002. – 964 p.*

8. *Bedienungsanleitung ECOM® KD. Kreative Technikausdem Hauserbr. – rbrMesstechnik GmbH, 2007 – P. 41 – 43.*

9. *Igumenceva N.V.* Statistical analysis of the experimental results and observations / N.V. Igumenceva, V. I. Pahomov. – Har'kov: OOO “Company Smit”, 2005 g. – P. 129 – 138 (Rus.)

10. Recommendation for metrology. Calibration characteristics of measuring instruments. Methods of construction. estimation errors. MI 2175-91. – S.-Pb.: VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 1997 – P. 3 – 15. (Rus.)

11. *Kobzar' A.I.* Applied mathematical statistics (for engineers and scientists) /A.I. Kobzar' // M.: FIZMATLIT, 2006. – P. 681 – 691. (Rus.)

12. *Plis A.I.* MathCad: Practical workshop for economists and engineers / A.I. Plis, N.A. Slivina. – M.: Finance and Statistics,1999.– P. 538 – 548. (Rus.)

13. *William M. Silvis.* The Algorithmic Structure of the Air/Fuel Ratio Calculation / Silvis M. William // Readout. – 1997. – №15. – P. 17 – 24.

Получено 17.12.2014

Received 17.12.2014

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА»**

В журнале публикуются результаты исследований по направлениям: тепло- и массообменные процессы; тепло- и массообменные аппараты; теория и практика сушки; теплоэнергетические установки; использование и сжигание топлива; атомная энергетика; коммунальная и промышленная теплоэнергетика; нетрадиционная энергетика; энергосбережение; энергоэффективность зданий, строительная теплофизика; экономическая эффективность энергетических проектов; термодинамика и процессы переноса; экология теплоэнергетичних объектов; измерение, контроль, автоматизация тепловых процессов.

Принимаются статьи на украинском, русском и английском языках.

**Статья должна быть структурирована в соответствии с требованиями ВАК Украины от 15.01.2003 г. №7-05/1 «О повышении требований к факховым изданиям, внесенным в перечень ВАК Украины» и содержать:**

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

**К статье должно прилагаться:**

- официальное письмо, подписанное руководителем организации, в которой выполнялась работа;
- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, изложенными ниже. Один экземпляр рукописи должен быть подписан всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- согласие авторов на возможное размещение статьи в Интернете после опубликования ее в журнале;
- полный почтовый адрес одного из авторов, контактный телефон и адрес электронной почты;
- компакт-диск с текстовым файлом и файлами рисунков (\*.jpg);
- копия документа о подписке на журнал (годовая, полугодовая).

**ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ:**

**Статья должна содержать:**

- шифр УДК; название статьи; фамилию, имя, отчество авторов;
- полное название организаций, где работают авторы, и их почтовый адрес;
- резюме на русском, украинском и английском языках (до 200-300 знаков), отображающее цель проведенных исследований и основные результаты;

- количество библиографических ссылок, таблиц, рисунков (например: “Библ. 9, табл. 1, рис. 3”);

- ключевые слова;
- список обозначений;
- статья на языке оригинала;
- реферат на русском, украинском и английском языках (600-800 знаков), отображающий краткое содержание статьи (цель, задачи, методы исследований, результаты);
- выводы по статье;
- список литературных источников (не более 15), в порядке ссылок на них в статье;
- **блок на латинице**, включающий:

- Название статьи на английском языке; Фамилию, имя, отчество всех авторов – транслитерацией;
- Полные наименования и почтовые адреса организаций, в которых работают авторы. Названия организаций, принадлежность их к конкретным ведомствам, почтовые адреса, город и страна подаются на английском языке без сокращений;
- Key words (ключевые слова);
- Список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но фамилии авторов и названия журналов, других литературных ссылок – транслитерацией кириллицы, а названия статей – на английском языке. После каждой ссылки в скобках необходимо указать язык оригинала статьи – (Рус.) или (Ukr.). Названия литературных источников представляются без сокращений.

• Транслитерация алфавита латиницей осуществляется в соответствии с постановлением Кабинета Министров Украины от 27.01. 2010 г. № 55 (см. <http://zakon.rada.gov.ua>).

- Объем статьи (с рисунками) – **не более 10 страниц** (междустрочный интервал – 1,5).

**ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ:**

Статья должна набираться в текстовом редакторе *Microsoft Word 97-2003*, редактор формул *MathType 5.0* и выше. Формат страницы – А4, поля сверху, снизу, слева – 2,5 см., справа – 1,5 см.

**Основной текст:** междустрочный интервал – 1,5. Шрифт – Times New Roman 11pt, выравнивание по ширине, автоматическая расстановка переносов, первый ряд – отступ 1,25 см. Название статьи – шрифт 12pt, жирный, заглавными литерами, размещение по центру. Статья оформляется без колонтитулов и нумерации страниц. При написании чисел дробную часть от целой отделять запятой, а не точкой.

Все обозначения выносятся из текста и представляются единым списком перед изложением материала статьи. Обозначения располагаются **в алфавитном порядке**, в столбик, вначале латинские, затем греческие, русские, далее индексы – верхние и нижние. При использовании в тексте сокращенных названий необходимо также дать их расшифровку в конце списка обозначений.

Пример:

- a* – коэффициент температуропроводности;
- Re – число Рейнольдса;

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА»  
(продолжение)

$T$  – температура;

$t$  – время;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

ЗСОВ – замкнутая система отопления и вентиляции.

Латинские обозначения величин и индексов должны печататься курсивом, (кроме const, exp, ln, max, min, Bi, Fo, M, Nu, Pr, Re, St, sin, cos, °C, K..., C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>...), греческие и русские – прямым шрифтом (в тексте, а также в формулах, на рисунках). Следует четко различать написание дефиса (-) и тире (–).

**Формулы:** математические формулы представляются в виде отдельных объектов в редакторе формул *MathType*. Шрифт – Times New Roman 11pt, выравнивание по центру, нумерация – в круглых скобках, справа. Для редактора формул используются такие параметры: греческие символы и буквы – шрифт Symbol. Остальные – Times New Roman. Размеры: обычный – 11pt, крупный символ – 14pt, крупный индекс – 8pt. Латинские литеры и символы должны представляться в стиле «Математический», кириллические – в стиле «Текст». Не допускается представление формул и их нумерации в виде таблицы. Символы в формулах и тексте статьи должны иметь одинаковые изображения.

**Рисунки:** рисунки (до 5 шт.) представляются в форматах JPG (300 dpi) без подрисовочных подписей и вставляются в текст как «рисунок», а не «полотно». Шрифт текста на рисунках – Times New Roman 11pt. Небольшие рисунки рекомендуется размещать с обтеканием текстом на 3 мм. Если рисунок вставлен, то необходимо отметить опцию «Перемещать с текстом» и «Установить привязку». Использование альбомной ориентации не допускается. Фотографии представлять лишь при крайней необходимости.

**Литература:** Список литературных источников (не более 15) нумеруется в порядке упоминания в тексте. Шрифт Times New Roman 10pt, фамилии авторов – курсивом. Сокращения названий цитированных источников не допускается.

Статьи, оформленные с несоблюдением Требований будут возвращаться авторам. Датой поступления будет считаться дата повторного поступления статьи, оформленной в соответствии с вышеизложенными Требованиями. Более детальную информацию можно получить в редакции журнала, т. (044) 456-48-67, E-mail: [shmorgun@ittf.kiev.ua](mailto:shmorgun@ittf.kiev.ua), [ihe@nas.gov.ua](mailto:ihe@nas.gov.ua), или на сайте журнала <http://www.ittf.kiev.ua>.

Почтовый адрес редакции: ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина.

**ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ:**

УДК 621.577

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ  
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ УКРАИНЫ**

Долинский А.А.<sup>1</sup>, академик НАН Украины, Фиалко Н.М.<sup>1</sup>, член-корреспондент НАН Украины, Навродская Р.А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Гнедой Н.В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук.

<sup>1</sup> *Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

<sup>2</sup> *Институт проблем энергетики НАН Украины, ул. Антоновича, 172, Киев, 03680, Украина*

Резюме укр., Резюме русск., Резюме англ.

Библ. 9, табл. 1, рис. 3

**Ключевые слова:** энергетическое хозяйство Украины, вторичные энергоресурсы, перспективы использования.

ТЕКСТ СТАТЬИ

(Текст оформляется в соответствии с вышеизложенным макетом статьи)

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистичний щорічник України за 2010 рік. – К.: Видавництво Консультант, 2011. – 551 с.
2. Фиалко Н.М., Зимин Л.Б. Анализ эффективности теплонасосных систем утилизации теплоты // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 77–85.

**CONDITION AND PROSPECTS OF USE OF  
SECONDARY POWER RESOURCES IN THE POWER  
ECONOMY OF UKRAINE**

**Dolinskiy A.A.<sup>1</sup>, Fialko N.M.<sup>1</sup>, Navrodska R.A.<sup>1</sup>, Gnedoy N.M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172, Antonovycha str., Kyiv, 03680, Ukraine*

The data about the structure and volume of waste energy output in the power sector of Ukraine are represented. Principles of changes of these volumes in concordance with the trends of the economy development are analyzed. The features of use of the different types of waste energy are considered. The prognostic assessment results of output volumes and the using levels of waste energy in the near future are given. References 4, tables 1, figures 5.

**Key words:** power economy, secondary power resources, waste energy.

1. Statistical annual of Ukraine for 2010. – Kyiv: Konsultant. – 2011. – 551p. (Ukr.)
2. Fialko N.M., Zimin L.B. Analysis of the efficiency of heat pump system for the utilization of sewage heat for the heat supply of social objects // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2008. – V. 30, № 1. – P. 77–85. (Rus.)