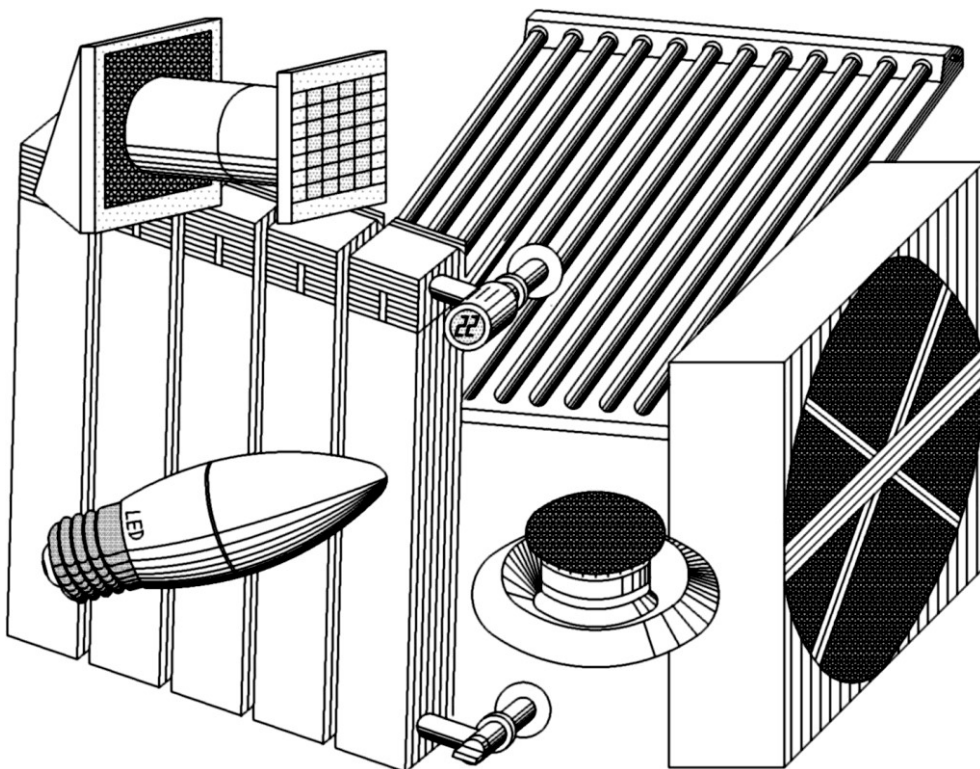


ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

2017

Випуск 23



КИЇВ 2017

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Kiev National University of Construction and Architecture

**VENTYLIATSIIA, OSVITLENNIA
TA TEPLOHAZOPOSTACHANNIA**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL COLLECTION

founded in 2001

ISSUE 23

Kyiv 2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 23

Київ 2017

УДК 697

ISSN 2409-2606

B29

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 23 / відповідальний редактор Е. С. Малкін. – Київ: КНУБА, 2017. – 64 с.

У збірнику висвітлюються результати наукових досліджень, питання теорії і практики з опалення, вентиляції і кондиціонування повітря, теплопостачання та газопостачання. Призначений для наукових працівників, викладачів, виробників, докторантів, аспірантів та студентів.

Редакційна колегія: докт. техн. наук, професор Е. С. Малкін (відповідальний редактор); канд. техн. наук, професор В. Б. Довгалюк (заступник відповідального редактора); канд. техн. наук, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний секретар); докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; докт. техн. наук, професор В. П. Корбут; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Михайленко; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 22 грудня 2017 року, протокол № 9.

Адреса редакційної колегії: Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра теплогазопостачання і вентиляції та кафедра теплотехніки, Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, 03037, Україна.

тел. +380(44)245-48-33

© Київський національний університет
будівництва і архітектури

ЗМІСТ

<i>До відома авторів</i>	5
В. Б. Довгалюк, Ю. В. Човнюк <i>Концептуальні основи аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних дисперсних тілах для формування мікроклімату музеїв</i>	6
О. В. Сергейчук, В. О. Єгорченков, Д. О. Радомцев <i>Нормування ультрафіолетового опромінення приміщень і територій за енергетичними критеріями</i>	25
К. М. Предун, Ю. Й. Франчук <i>Аналіз та оцінка заходів щодо підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання</i>	31
М. Kordyukov <i>Marking technology of energy efficiency for HVAC</i>	36
О. Ф. Редько, Ю. І. Чайка, Ю. О. Бурда <i>Підвищення ефективності очищення коксового газу від пилу, вуглекислого газу та парів формальдегіду в скруберах насадкового типу</i>	39
Г. С. Ратушняк, М. В. Свідеревич <i>Логіко-ймовірнісна оцінка ризиків аварій на трубопроводах теплових мереж</i>	44
А. Ф. Редько, И. А. Редько, Ю. А. Пивненко <i>Экспериментальные исследования сжигания биотоплива в кипящем слое</i>	52
<i>Дудніков Анатолій Пантелійович (1938-2016)</i>	61

CONTENTS

<i>Information for the Authors</i>	5
V. Dovhaliuk, Y. Chovnyuk <i>Theoretical Development of Thermal-Exchange and Deformation Processes in Polymerical Dispersion Solids for Microclimate Forming in Museums (in Ukrainian)</i>	6
O. Sergeychuk, V. Egorchenkov, D. Radomtsev <i>Standardization of Ultraviolet Irradiation of Rooms and Territories by Energy Criteria (in Ukrainian)</i>	25
K. Predun, U. Franchuk <i>Analysis and evaluation of energy efficiency improvement efforts of the municipal heating systems (in Ukrainian)</i>	31
M. Kordyukov <i>Marking technology of energy efficiency for HVAC</i>	36
O. Redko, Y. Chayka, Y. Burda <i>Increasing the efficiency of cleaning coke oven gas from dust, carbon dioxide and formaldehyde vapors in scrubbers of the attachment type (in Ukrainian)</i>	39
G. Ratushnyak, M. Sviderevych <i>Logical-probabilistic assessment of the risks of accidents on the pipelines of heating networks (in Ukrainian)</i>	44
O. Redko, I. Redko, Y. Pivnenko <i>Experimental studies of combustion of biofuel in a fluidized bed (in Russian)</i>	52
<i>Dudnikov Anatolii Panteliiovych (1938-2016) (in Ukrainian)</i>	61

До відома авторів

Шановні автори статей науково-технічного збірника "Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання".

Даний випуск Збірника «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» присвячений світлій пам'яті відомого спеціаліста в галузі опалювальної техніки, засновника та директора Сертифікаційного випробувального центру опалювального обладнання Дуднікова Анатолія Пантелійовича (1938-2016).

Звертаємо увагу на неухильне дотримання вимог до рукописів, розміщених на сайті <http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=43>.

Кількість слів анотації має бути суворо 100...250. Рисунки мають чітко читатися після внесення до тексту. Розмір шрифту на рисунках після внесення до тексту має бути 9...12 pt.

Згідно з Указом Президента України №133/2017 в Україні закрито доступ до mail.ru, inbox.ru, Yandex та Rambler. Автори мають зазначати електронну адресу на інших серверах.

Триває розширення рецензійного комітету Збірника. Запрошуємо авторів з науковим ступенем доктора або кандидата наук долучитися до рецензійного комітету. Для цього прохання заповнити анкету та надіслати її (можна разом з наступним рукописом) на адресу votgp@ukr.net.

ЗГОДА НА ВСТУП ДО РЕЦЕНЗІЙНОГО КОМІТЕТУ

Прізвище: _____

Ім'я: _____

По-батькові: _____

Науковий ступінь: _____

Учене звання: _____

Контактний телефон: _____

Електронна пошта: _____

Володіння мовами:

- українська
 англійська
 російська
 інші _____

Цим даю згоду бути рецензентом рукописів до науково-технічного збірника "Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання" з тематики:

Підпис

П.І.Б.

Information for the Authors

Dear authors of articles of the Scientific and Technical Collection "Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohozopostachannia" ("Ventilation, Illumination and Heat and Gas Supply").

This issue of the Collection is dedicated to blessed memory of the famous heating technology specialist, founder and director of the Certification Testing Centre for Heating Equipment Dudnikov Anatolii (1938-2016).

Pay attention to the strict adherence to the Requirements for manuscripts, placed on the site <http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=43>.

The number of words in abstract should be strictly 100...250. Figures should be clearly readable after insertion into the text. Font size on the figures in the text must be 9...12 pt.

According to the Decree of the President of Ukraine No133/2017, access to Mail.ru, Inbox.ru, Yandex, and Rambler is denied in Ukraine. Authors may use an E-Mail on other servers.

Increase of the review committee of the Collection is continuing. We are glad to invite the authors with scientific degree of Science Doctor or Philosophy Doctor to the review committee. Please fill in the following form and send it (possibly with the next manuscript) to E-Mail: votgp@ukr.net.

CONSENT TO JOIN THE REVIEW COMMITTEE

Surname: _____

Name: _____

Scientific degree: _____

Academic status: _____

Phone: _____

E-Mail: _____

Language skills:

- Ukrainian
 English
 Russian
 other _____

I hereby agree to be a reviewer of the manuscripts for the scientific and technical collection "Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohozopostachannia" on subjects:

Signature

Surname and initials

УДК 539.3(075)

Концептуальні основи аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у полімерних дисперсних тілах для формування мікроклімату музеїв

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк²

¹к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, 2280170@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, uchovnyuk@ukr.net

Анотація. Для збереження музейних експонатів, серед яких полімерні дисперсні, необхідно забезпечити параметри мікроклімату, що максимально уповільнюють старіння та деградацію. Використовуючи теорію Больцмана-Вольтерри, перший закон термодинаміки для відкритих систем та метод визначення параметрів функцій впливу, обґрунтована адекватна фізико-механічна модель, яка описується системою диференціальних рівнянь для аналізу тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних матеріалах. Показано, що при дослідженні впливу теплоти й вологи на деформаційні властивості полімерних матеріалів, більш адекватним є не однобічне врахування впливу тепломасообміну на реологічні процеси, а опис їхнього взаємного впливу один на одного. Такий підхід дозволяє вивчити вплив температурно-вологісного режиму музейних приміщень на процеси навантаження й деформування полімерно-дисперсних матеріалів музейних експозицій. Уведення в систему диференціальних рівнянь, що описують процеси тепломасообміну й деформації в колоїдних капілярно-пористих тілах з урахуванням відносної вологості середовища, у якому знаходиться матеріал, дозволяє максимально точно описати процеси, які відбуваються при музейному зберіганні експонатів. Отримані в роботі результати можуть бути використані для розробки інженерних методів розрахунку систем формування мікроклімату музейних приміщень, як на стадіях проектування відповідних технічних систем, так і в режимах реальної експлуатації останніх.

Ключові слова: тепломасообмін, деформація, дисперсність, матеріали.

Постановка проблеми. Однією з найбільш важливих задач збереження історичної спадщини є збереження музейних експонатів, серед яких левову частку складають полімерні дисперсні. Відомо, що проблема взаємного впливу тепломасообмінних і деформаційних явищ має безумовний теоретичний та прикладний інтерес, і тому досліджена багатьма вченими. Ця задача важлива для вивчення впливу температурно-вологісного середовища на процеси навантаження і деформування полімерно-дисперсних матеріалів музейних експозицій. Хоча сучасній науці й відома низка теоретичних методів врахування впливу теплоти й вологи на деформаційні властивості, зокрема, дисперсних матеріалів, проте автори вважають більш послідовним не однобічне врахування впливу теплообміну на реологічні процеси, а опис їхнього взаємного впливу один на одного. Зрозуміло, що такий комплексний опис вимагає залучення не тільки механічних, але й термодинамічних закономірностей у їхній взаємодії.

Актуальність дослідження. Музейні експонати є автентичними предметами, які наочно відображають історію і культуру народу, його побут, життя, працю, вірування тощо. Вони є безцінними, тому збереження їх є актуальною світовою задачею.

Останні дослідження та публікації. У межах спадкової теорії Больцмана-Вольтерри [1] вплив теплоти й вологи на повзучість матеріалів і релаксацію напружень у них враховується, зазвичай, методом фактор-часових аналогій [2, 3] з забезпеченням якісного збігу з експериментальними даними. Теорія сушіння дисперсних матеріалів викладена у [4]. Автори [5, 6] розробили методи вивчення аналізу взаємозв'язку та прогнозування тепломасообмінних і фізико-механічних властивостей дисперсних матеріалів. Анізотропні пружні та пружно-в'язкі матеріали досліджені теоретично в роботах [7, 8]. Метод визначення параметрів функцій впливу викладений у роботі [9]. Результати наведених вище робіт будуть частково використані у даному дослідженні.

Формулювання цілей статті. Мета роботи полягає в обґрунтуванні системи диференціальних рівнянь для сумісного опису тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних матеріалах. Задля досягнення мети роботи використані математичні моделі, що описують анізотропні пружні й пружно-в'язкі властивості дисперсних матеріалів (середовищ), та метод М.А. Колтунова [9] визначення параметрів функцій впливу.

Механічні закономірності та врахування анізотропії дисперсного матеріалу. Розглянемо спочатку задачу про одноосьове навантаження (чи розтяг) зразків у вигляді невеликих стрижнів (ниток, стрічок, смуг і т. д.) з гідрофільного матеріалу в умовах тепло- й масообміну їх з середовищем. Для ізотропного матеріалу, будемо вважати, що повзучість (п) матеріалів і релаксація (р) напружень у них може бути описана за допомогою спадкових співвідношень БВ (у формулах застосовуються загально прийняті значення [8]):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_{t_0}^t K(t, \tau) \cdot \frac{\sigma(\tau)}{E} d\tau, \quad (1п)$$

$$\sigma(t) = E \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_{t_0}^t R(t, \tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau \right], \quad (1р)$$

де $\varepsilon(t)$ – деформація; $\sigma(t)$ – напруження, які залежать від часу (t); E – модуль пружності матеріалу стрижня; (t_0) – початок відліку часу (зазвичай, $t_0 = 0$); $K(t, \tau)$ – ядро повзучості; $R(t, \tau)$ – ядро релаксації дисперсійного матеріалу.

У більш загальному випадку анізотропного (наприклад, ортотропного) пружно-в'язкого середовища, на яке діють не тільки механічні, але й температурні поля, лінійні співвідношення між деформаціями та напруженнями мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij}(t) = \int_0^t R_{ijkl}(t - \tau) \times \\ \times d\{\varepsilon_{kl}(\tau) - \tilde{\alpha}_{kl} \Delta[T(\tau)]\}; \\ \varepsilon_{ij}(t) - \tilde{\alpha}_{ij} \cdot \Delta[T(\tau)] = \\ = \int_0^t \Pi_{ijkl}(t - \tau) \cdot d\sigma_{ke}(\tau), \end{array} \right. \quad (2)$$

де (i, j, k, l)=(1-3); R_{ijkl} – тензор функції релаксації; Π_{ijkl} – тензор функції повзучості; $\tilde{\alpha}_{ij}$ – тензор коефіцієнтів температурного розширення речовини; $\Delta[T(\tau)]$ – різниця між поточною $T(t)$ й початковою температурою; $\sigma_{ij}(t)$ та $\varepsilon_{ij}(t)$ – тензори напружень та деформації, відповідно.

Наприклад, для ортотропних матеріалів, які працюють в умовах плоского напруженого стану в стаціонарних температурних полях [$\Delta T(t)=0$], рівняння зв'язку напружень і деформації у розгорнутому вигляді мають вигляд:

$$\sigma_{11}(t) = B_{1111} \cdot \varepsilon_{11}(t) - B_{1111} \times$$

$$\times \int_0^t T_{1111}(t - \tau) \cdot \varepsilon_{11}(\tau) d\tau + B_{1122} \cdot \varepsilon_{22}(t) - B_{1122} \times \int_0^t T_{1122}(t - \tau) \cdot \varepsilon_{22}(\tau) d\tau; \quad (3)$$

$$\sigma_{22}(t) = B_{2211} \cdot \varepsilon_{11}(t) - B_{2211} \times \int_0^t T_{2211}(t - \tau) \cdot \varepsilon_{11}(\tau) d\tau + B_{2222} \times \varepsilon_{22}(t) - B_{2222} \cdot \int_0^t T_{2222}(t - \tau) \times \varepsilon_{22}(\tau) d\tau; \quad (4)$$

$$\sigma_{12}(t) = 2 \cdot B_{1212} \cdot \varepsilon_{12}(t) - 2 \times B_{1212} \cdot \int_0^t T_{1212}(t - \tau) \cdot \varepsilon_{12}(\tau) d\tau, \quad (5)$$

де B_{1111} , B_{1122} , B_{2222} , B_{1212} – головні модулі пружності:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{1111} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2}; \\ B_{1122} = \frac{\nu_1 \cdot E_{22}}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2} = \frac{\nu_2 \cdot E_{11}}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2} = B_{2211}; \\ B_{2222} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_1 \cdot \nu_2}; \\ 2B_{1212} = G = \frac{E_{45}}{2} \cdot (1 - \nu_{45})^{-1}, \end{array} \right. \quad (6)$$

G – модуль зсуву матеріалу, E_{11} , E_{22} , E_{45} – модулі пружності вдовж осі 1, вдовж осі 2 й під кутом 45° до осі 1, відповідно; (ν_1, ν_2) – коефіцієнти Пуассона розтягнутих зразків вдовж осей 1 та 2, відповідно; T_{ijkl} – функції швидкостей релаксації (у цьому випадку (i, j, k, l)=(1,2)). Слід зазначити, що рівняння повзучості чи релаксації для анізотропних середовищ будуються аналогічно викладеному вище при $\sigma_{ij}(t) = \text{const}$ чи $\varepsilon_{ij}(t) = \text{const}$. У цьому випадку $i = 1...3, j = 1...3$.

Моделювання ядр повзучості та релаксації дисперсних матеріалів. Розглянемо далі основні методи моделювання ядр повзучості та релаксації дисперсних матеріалів. У роботах [7-11] наведений підхід до вибору ядр при розв'язуванні задач із урахуванням процесів повзучості та релаксації. Якщо розглядаються процеси деформування пружнов'язких середовищ, механічні властивості яких не залежать від часу, тоді в

рівняннях спадкової теорії Больцмана - Вольтерри (БВ):

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \cdot \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau; \\ \sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) - E \cdot \int_0^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau, \end{cases}$$

де $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ – напруження та деформації в матеріалі в моменті спостереження t за одноосового напруженого стану; τ – момент часу, який передре моменту часу t ; E – модуль пружності; $K(t-\tau)$, $R(t-\tau)$ – так звані функції впливу (або ядра повзучості і релаксації, відповідно).

Ядра $K(t-\tau)$, $R(t-\tau)$ присутні у вигляді ядер різницевого типу, що є наслідком незалежності властивостей матеріалу від часу. Інакше $K(t-\tau)$ і $R(t-\tau)$ ще називають кривими функцій швидкості повзучості та релаксації, відповідно. Зрозуміло, що такі криві можна побудувати за даними диференціювання дослідних кривих повзучості й релаксації. Проте помилки суб'єктивного характеру часто призводять до неправильних або надто грубих результатів. Тому в практичній діяльності використовують аналітичну форму запису функцій впливу, яка має деяке число параметрів, які визначені за допомогою дослідів.

Доволі часто зустрічаються в літературі функції впливу у вигляді експоненти $A \cdot e^{-\beta t}$ або суми експонент $\sum_n A_n e^{-\beta_n t}$. Такі функції не будемо розглядати, оскільки такі функції не описують процес у початковий період – при $t = 0$ вони мають скінченне значення.

Наведемо умови, яким повинні задовольнити функції $K(t)$, $R(t)$ [7]:

- 1) $\lim_{t \rightarrow 0} K(t) = \infty$;
- 2) між $K(t)$ і $R(t)$ існує співвідношення

$$R(t) - K(t) = \int_0^t K(t-\tau)R(\tau)d\tau,$$

тоді оскільки $K(0) = \infty$, то й $R(0) = \infty$;

- 3) інтеграл $\int_0^t K(\tau)d\tau$ повинен збігатися;
- 4) інтеграл $\int_0^t R(\tau)d\tau$ повинен не перевищувати одиницю.

Такі слабко сингулярні функції добре описують швидкості релаксаційних процесів, якщо до їх складу входить достатня кількість параметрів.

З використанням умови п. 2 можна записати:

$$R(t) = K(t) + \int_0^t K(t-\tau)R(\tau)d\tau. \quad (7)$$

У теорії інтегральних рівнянь Вольтерри другого роду функція $R(t)$ називається ядром рівняння

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) - E \cdot \int_0^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau, \quad (8)$$

а функція $K(t)$ – його резольвентою. Якщо для ядра $R(t)$ знайдена резольвента $K(t)$, тоді рівняння:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \cdot \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau \quad (9)$$

називається розв'язком рівняння (8), і навпаки, рівняння (8) буде розв'язком рівняння (9), якщо для ядра $K(t)$ рівняння (9) знайдена резольвента $R(t)$.

У роботі [8] наведений приклад визначення резольвенти за даним ядром. Візьмемо найпростіше і разом з тим доволі загальне слабко сингулярне ядро у вигляді:

$$R(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1}, 0 < \alpha < 1. \quad (10)$$

Перетворення за Лапласом рівнянь (8) і (9) ($f^*(p) = \int_0^\infty e^{-pt} \cdot f(t) \cdot dt$) дає:

$$\frac{1}{E} \cdot \sigma^* = \varepsilon^* \cdot (1 - R^*), E \cdot \varepsilon^* = \sigma^* \cdot (1 + K^*).$$

Звідси

$$K^*(p) = \frac{T^*(p)}{1 - T^*(p)}. \quad (11)$$

Перетворенням Лапласа функції (10) буде:

$$\begin{aligned} R^*(p) &= \int_0^\infty e^{-pt} \cdot \frac{A \cdot e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}} dt = \\ &= A \cdot \int_0^\infty \frac{e^{-(\beta+p)t}}{t^{1-\alpha}} dt = \frac{A \cdot \Gamma(\alpha)}{(p + \beta)^\alpha}. \end{aligned} \quad (12)$$

де $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція Ейлера.

Якщо занести вираз (12) до рівняння (11), матимемо зображення резольвенти:

$$K^*(p) = \frac{A \cdot \Gamma(\alpha)}{(p + \beta)^\alpha - A \cdot \Gamma(\alpha)}. \quad (13)$$

Щоб знайти резольвенту $K(t)$, використаємо теорему про зміщення, на основі якої оригінал функції (13) буде:

$$K(t) = e^{-\beta t} \cdot \tilde{K}(t), \quad (14)$$

де $\tilde{K}(t)$ – оригінал функції

$$\tilde{K}^*(p) = \frac{A \cdot \Gamma(\alpha)}{p^\alpha - A \cdot \Gamma(\alpha)}. \quad (15)$$

Праву частину рівності (15) можна подати у вигляді суми спадної геометричної прогресії:

$$\tilde{K}^*(p) = \sum_{n=1}^{\infty} [A \cdot \Gamma(\alpha)/p^\alpha]^n. \quad (16)$$

Легко впевнитися, що зображенням функцій $f(t) = t^{k-1}/\Gamma(k)$, $k > 1$, є функція $f^*(p) = 1/p^k$. Відповідно, оригіналом функції (16) буде [9]:

$$\tilde{K}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A \cdot \Gamma(\alpha)]^n t^{n\alpha-1}}{\Gamma(\alpha_n)}, \quad (17)$$

а шуканою резольвентою, згідно з (14),

$$K(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[A \cdot \Gamma(\alpha)]^n \cdot t^{\alpha n}}{\Gamma(\alpha_n)}. \quad (18)$$

Ряд у формулі (18) рівномірно збігається за t на будь-якому скінченному інтервалі часу. Можна показати, що для великих значень t резольвента має асимптотичну формулу:

$$K(t) \approx \frac{1}{\alpha} \cdot [A \cdot \Gamma(\alpha)]^{1/\alpha} \cdot e^{([A \cdot \Gamma(\alpha)]^{1/\alpha} - \beta) \cdot t}. \quad (19)$$

З формули (19) випливає, що при достатньо великих значеннях t при:

$$а) \frac{\beta^2}{A \cdot \Gamma(\alpha)} > 1, \quad K(t) \rightarrow 0, \quad (20)$$

тобто швидкість деформації повзучості при $\sigma = const$ прямує до нуля ($K(t) = (E/\sigma_k) \cdot d\varepsilon(t)/dt$, $\sigma(t) = \sigma_k = const$). Це відповідає випадку обмеженої повзучості, коли деформація набуває скінченного постійного значення. У цьому випадку

маємо справу зі стійким процесом деформування:

$$б) \frac{\beta^\alpha}{A \cdot \Gamma(\alpha)} < 1, \quad K(t) \rightarrow \infty, \quad (21)$$

що означає, згідно з залежністю

$$K(t) = \frac{E}{\sigma_k} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{d\tau}, \quad \sigma(t) = \sigma_k = const$$

зростання швидкості деформації до нескінченності. Це так званий випадок необмеженої повзучості. Тут процес деформування нестійкий:

$$в) \frac{\beta^2}{A \cdot \Gamma(\alpha)} = 1, \quad K(t) \rightarrow const, \quad (22)$$

що відповідає випадку усталеної повзучості, де починаючи з деякою t швидкість деформування $\dot{\varepsilon} = ds(t)/dt = const$. Ділянка кривої повзучості є прямою лінією. На цій ділянці маємо т. з. байдужий процес деформування.

У випадках (б) та (в) спостерігається ефект незворотності.

Визначення механічних характеристик нестабільних (дисперсних) матеріалів. Вище розглядалися процеси деформування пружнов'язких середовищ, механічні властивості яких не залежать від часу. У рівняння спадкової теорії БВ для таких середовищ входять ядра різницевого типу, що є наслідком незалежності властивостей від часу.

Більш загальним є випадок, коли властивості матеріалу залежать від деякого скалярного фізичного параметра B , який у свою чергу є функцією часу (але не просторових координат!). Під параметром B розумітимемо у подальшому будь-який фактор, який справляє вплив на механічні властивості матеріалу (температура, вологість та ін.). У найбільш загальному випадку миттєвий модуль пружності залежить від значення параметра B в момент спостереження, у той час як параметри ядра релаксації можуть залежати від значень B як у момент спостереження, так і у момент τ , який передує моменту спостереження ($0 \leq \tau \leq t$).

Зв'язок між напруженнями й деформаціями в загальному випадку стає неінваріантним відносно початку відліку часу та набуває вигляду:

$$\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon(t) - \int_0^t R(t, \tau) \varepsilon(\tau) d\tau. \quad (23)$$

Якщо параметр B залишається постійним у процесі деформування, то ядро R у рівнянні (23) знову стає різницеvim, але на відміну від ядра звичайного (7) залежить від B як від параметра:

$$\sigma(t) = E(B) \cdot \varepsilon(t) - \int_0^t R(B, t - \tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau. \quad (24)$$

Приймаємо ядро рівняння (24) у формі [12]:

$$R(B, t - \tau) = \frac{A_0(B) \cdot e^{-\beta_0(B) \cdot (t-\tau)}}{(t - \tau)^{1-\alpha}}, \quad \alpha = \text{inv}(B). \quad (25)$$

З даним дисперсним матеріалом слід виконати експерименти на повзучість (релаксацію) за різних значень параметра B , які зберігаються в кожному експерименті й змінюються від експерименту до експерименту. Тоді згідно з методикою, викладеною в [7, 10], можна визначити функції $E(B)$, $A_0(B)$, $\beta_0(B)$ та константу α .

На сьогодні невідома методика, яка б дозволяла визначити ядро релаксації при $B = B(t)$. У цьому випадку слід постулювати вид ядра $R(t, s)$ таким чином, щоб при $B = \text{const}$ воно збігалось з ядром (25). Зрозуміло, що вигляд ядра $R(t, s)$, який задовольняє вказаній вимозі, не буде єдиним. Скористуємось цією свободою вибору виду ядра $R(t, s)$ й задаємо ядро релаксації при $B = B(t)$ таким чином, щоб рівняння (23) після деякого перетворення змінних звелось до найпростішого виду. З цією метою у випадку $B = B(t)$ приймаємо

$$R(t, s) = \frac{A_1(t, s) \cdot e^{-\beta(t,s) \cdot (t-s)}}{(t - s)^{1-\alpha}}, \quad (26)$$

де

$$\begin{cases} \beta(t, s) = \frac{1}{t - s} \cdot \int_s^t \beta_0(B(\tau)) d\tau; \\ A_1(t, s) = \bar{A}(B(s)) \cdot \frac{\beta_0(B(s))}{\beta^{1-\alpha}(t, s)}; \\ \bar{A}(B) = \frac{A_0(B)}{\beta_0^\alpha(B)}. \end{cases} \quad (27)$$

Легко зрозуміти, що при $B = \text{const}$ ядро (26) збігається з ядром (25).

Перетворення часу

$$\begin{aligned} 0,05 \cdot t' &= \int_0^t \beta_0(B(\tau)) d\tau, \\ 0,05 \cdot s' &= \int_0^s \beta_0(B(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (28)$$

приводить рівняння (23) з ядром (26) до вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma(t') &= \\ E(t') \cdot &\left[\varepsilon(t') - \int_0^{t'} \frac{(0,05)^\alpha \cdot \bar{A}(s')}{E(t')} \times \right. \\ &\left. \times \frac{e^{-0,05 \cdot (t'-s')}}{(t' - s')^{1-\alpha}} \cdot \varepsilon(s') d(s') \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

Слід зазначити, що при:

$$E = \text{inv}(B) \text{ та } \bar{A}(B) = \frac{A_0(B)}{\beta_0^\alpha(B)} = \text{inv}(B) \quad (30)$$

рівняння (29) перетворюється на наступне:

$$\begin{cases} \sigma(t') = E \cdot \varepsilon_k \cdot \left[1 - \int_0^{t'} R(\tau) d\tau \right], \\ \varepsilon(t') = \varepsilon_k = \text{const}, \\ R(\tau) = -\frac{1}{E \cdot \varepsilon_k} \cdot \frac{d\sigma(t')}{dt'}, \quad t' \equiv \tau. \end{cases} \quad (31)$$

Тобто має місце або температурно-часова аналогія [2,3,7], або вологісно-часова аналогія [13].

Як приклад, у табл. 1 з роботи [7] наведено залежності параметрів E , A_0 , β_0 , α капрону від вологості B , знайдені методом суміщень [7, 10].

Таблиця 1
Залежності параметрів E , A_0 , β_0 , α функції впливу для капрону від вологості B , %

B , %	2,6	3,2	4,0	5,1
$E(B)$, МПа	1360	1220	940	735
$A_0(B)$, МПа · с ^{-α}	31,8	32,2	36,3	21,3
$\beta_0(B)$, с ⁻¹	0,05	0,05	0,05	0,05

Наочне уявлення про сутність, наприклад, температурно-часової аналогії при деформуванні полімерних матеріалів можна отримати з [6, 14, 15, 16].

Моделі процесу напружень у матеріалах при тепло- та масообміні. Розглянемо далі моделі процесу напружень у (полімерних) матеріа-

лах при їхньому тепло- й масообміні з навколишнім середовищем [17-20].

Релаксація напружень $\sigma(t)$ у попередньо деформованих вологих полімерних матеріалах є досить частим явищем у процесах гіротермічної обробки цих матеріалів. Вивчення кривих $\sigma(t)$ дає цінну інформацію для обрання отриманих режимів зовнішньої термічної обробки матеріалів. Однак, процес релаксації напружень у (полімерних) матеріалах при тепло- й, особливо, масообміні з навколишнім середовищем до теперішнього часу повністю ще не досліджений.

Детальне експериментальне дослідження процесів релаксації напруження й повітряно- сухих й зволжених полімерних матеріалах різних типів [17] показало, що криві $\sigma(t)$ для всіх досліджених повітряно-сухих зразків мають вид спадної кривої експоненційного типу. Однак, для ряду вологих матеріалів зміна $\sigma(t)$ в процесі зневоднення носить суттєво немоно-тонний характер. На відповідних кривих $\sigma(t)$ в певний період часу спостерігається так звана зворотна релаксація (астрингація) напруження. Було з'ясовано, що явище астрингації характерне для групи матеріалів, які належать до класу колоїдних капілярно-пористих тіл, що обмежено набрякають при зволоженні та дають усадку при сушці.

Повний теоретичний опис процесу релаксації напружень в умовах тепло- й масообміну вимагає комплексного підходу із залученням законів нерівноважної термодинаміки. Але для попереднього теоретичного дослідження даної проблеми можна обмежитись опосередкованим (феноменологічним) урахуванням ефектів. При цьому вважають, що тепло- й масообмін безперервно змінюють в'язкісні та інші механічні властивості матеріалу в процесі їхнього сушіння. Використовуючи основні постулати спадкової теорії Больцмана-Вольтерри [18] та обмежуючись для спрощення модельним прикладом, покажемо, що призводить до астрингації може зростання внутрішніх напружень у матеріалі, пов'язане з його усадкою.

Припустимо, що в початковий момент часу t_0 вологий зразок знаходиться під впливом порівняно невеликого розтягу $\varepsilon_0 = (3...5) \%$, а потім відбувається його ізометричне та ізотермічне сушіння. Будемо вважати, що механічні властивості матеріалу починають змінюватись з певного моменту часу $t = t_a$. Зокрема, з цього моменту починається усадка, яка викликає зміну $\varepsilon(t)$. Такий процес феноменологічно можна описати модельною формулою [17]:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \theta(t - t_a) \cdot \varepsilon_1 \cdot [1 - e^{-\gamma(t-t_a)}], \quad (32)$$

де $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ та γ – константа; $\theta(x)$ – одинична «сходишка» (функція Гевісайда),

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq 0; \\ 0, & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Згідно з теорією Больцмана-Вольтерри (БВ) напруження $\sigma(t)$, які виникають у зразку при його розтягу $\varepsilon(t)$, визначаються виразом [18]:

$$\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon(t) - \int_{t_0}^t R(t, \tau) \cdot E(\tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau, \quad (33)$$

у якому властивості матеріалу та закономірності процесу повинні відобразитися модулем пружності $E(t)$ та ядром релаксації $R(t, \tau)$.

Згідно з формулою (33) з урахуванням виразу (32) матимемо:

$$\begin{aligned} \sigma(t) = E(t) \cdot \left\{ \varepsilon_0 + \theta(t - t_a) \cdot \varepsilon_1 \times \right. \\ \left. \times [1 - e^{-\gamma(t-t_a)}] \right\} - \int_{t_0}^t R(t, \tau) \cdot E(\tau) \times \\ \times \varepsilon_0 \cdot d\tau - \theta(t - t_a) \times \\ \times \int_{t_a}^t R(t, \tau) \cdot E(\tau) \cdot \varepsilon_1 \cdot [1 - e^{-\gamma(\tau-t_a)}] d\tau. \quad (34) \end{aligned}$$

Суму виразу (34) можна розкласти на дві складові частини:

$$\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t).$$

Перша група складових:

$$\sigma_1(t) = E(t) \cdot \varepsilon_0 - \int_{t_0}^t R(t, \tau) \cdot E(\tau) \cdot \varepsilon_0 \cdot d\tau. \quad (35)$$

Якщо прийняти, що $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = const$, за $E(t) = E_0 = const, t_0 = 0$ й відповідно до вибору ядра $R(t, \tau)$ (35) відповідає випадку звичайної релаксації, яка мала би місце за відсутності усадки $\varepsilon_1 = 0$. Зокрема, якщо прийняти, що:

$$R(t, \tau) = a \cdot k \cdot e^{-a \cdot k \cdot (t-\tau)} \cdot (t - \tau)^{k-1} \quad (36)$$

тоді після підстановки формули (36) до рівняння

(35) і нескладних перетворень матимемо відоме рівняння Кольрауша. Воно адекватно описує процес релаксації напружень у повітряно – сухих та вологих зразках тканин і композитних матеріалів [19, 20].

Друга група складових:

$$\sigma_2(t) = \theta(t - t_a) \left\{ E(t) \cdot \varepsilon_1 \times \left[1 - e^{-\gamma(t-t_a)} \right] - \int_{t_a}^t R(t, \tau) \cdot \varepsilon_1 \times \left[1 - e^{-\gamma(t-t_a)} \right] \cdot d\tau \right\}, \quad (37)$$

яка пов'язана з усадкою ($\varepsilon \neq 0$), у прийнятій моделі дає внесок у сумарну величину $\sigma(t)$ тільки при $t > t_a$. Якщо прийняти, що при $t > t_a$

$$E(t) = E_1 = const, \\ R(t, \tau) = \chi_1 \cdot e^{-\alpha_1(t-\tau)},$$

тоді в результаті обчислень згідно з формулою (37) отримаємо явний вираз для $\sigma_2(t)$:

$$\sigma_2(t) = E_1 \cdot \varepsilon_1 \left[\frac{\alpha_1 - \chi_1}{\alpha_1} - \frac{\gamma - \alpha_1 + \chi_1}{\gamma - \alpha_1} \times e^{-\gamma(t-t_a)} + \frac{\chi_1 \cdot \gamma}{\alpha_1 \cdot (\gamma - \alpha_1)} \cdot e^{-\alpha_1(t-t_a)} \right]. \quad (38)$$

Аналіз формули (38) показує, що крива $\sigma_2(t)$ починається з нуля при $t = t_a$, проходить максимум і виходить на константу, тобто якісно має вид, який підтверджує експериментальну криву усадкових напружень $\sigma_{yc}(t)$ [17].

Таким чином, складова σ_2 , обумовлена усадкою ε_1 , при певному сполученні параметрів χ_1 , α_1 , γ може протягом деякого проміжку часу бути величиною, що зростає. При достатньо значній усадці ε_1 та високій швидкості зростання складової σ_2 вона може забезпечити підйом релаксаційної кривої, тобто астрингацію. При невеликих ε_1 та малій швидкості зростання σ_2 можливе лише сповільнення спадання $\sigma(t)$ порівняно з безусадковим процесом.

З фізичних міркувань релаксаційній частині $\sigma_1(t)$ найбільше відповідає релаксація напружень $\sigma_B(t)$ у матеріалі за відсутності масообміну (зразок знаходиться у воді). Проте в цьому випадку не враховується неперервна зміна механічних властивостей зразка зі зменшенням умісту води [17].

Другій частині, тобто $\sigma_2(t)$, повинна відповідати експериментальна крива усадкових напружень $\sigma_{yc}(t)$, отримана в умовах ізометричного сушіння зразків (при $\varepsilon_0 = 0$). Але в цьому досліді не враховується можливий (для деяких матеріалів) вплив попереднього розтягу на зростання усадкових напружень [17]. Другій частині, тобто $\sigma_2(t)$, повинна відповідати експериментальна крива усадкових напружень $\sigma_{yc}(t)$, отримана в умовах ізометричного сушіння зразків (при $\varepsilon_0 = 0$). Але в цьому досліді не враховується можливий (для деяких матеріалів) вплив попереднього розтягу на зростання усадкових напружень [17].

Автори [17] стверджують, що порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що для таких матеріалів, як віскозна плівка та шкіра, розрахунок за наведеними вище формулами адекватно передає експериментальні криві $\sigma(t)$. Для тканин спостерігається суттєве відхилення результатів, що пояснюється складною будовою тканини. У досліді без попереднього натягу ($\varepsilon_0 = 0$) зразків тканин у початковий період усадки відбувається натяг (виробіток) зсувів ниток, і тільки після цього починається зростання $\sigma_{yc}(t)$. Тому величина $\sigma_2(t)$ занижена. У досліді щодо релаксації попередньо розтягнутих ($\varepsilon_0 = 5\%$) вологих зразків тканин початок усадки збігається зі зростанням $\sigma_2(t)$ [17].

Таким чином, аналіз експериментальних кривих та спадкова теорія БВ свідчать про те, що астрингація при зневодненні матеріалів обумовлена їхньою усадкою [17]. Відповідно, за певних умов тепло- й масообміну в деформованих вологих полімерних матеріалах, які належать до класу колоїдних капілярно-пористих тіл, може спостерігатись явище зворотної релаксації. У результаті зростання внутрішніх напружень у матеріалі можуть змінюватися його властивості, що слід враховувати при інтенсифікації гіротермічних процесів обробки цих матеріалів.

Моделювання процесів астрингації.

Розглянемо далі можливість моделювання процесів астрингації за допомогою сплайн-часових функцій за експериментальними результатами. Типовий графік залежності $\sigma(t)$ при врахуванні ефекту астрингації має вигляд, наведений на рис. 1.

Точки А, Б, В, Г, Д на діаграмі $\sigma(t)$ відповідають експериментальним значенням $\sigma_i(t_i)$, $i = 0, 1, 2, 3, 4$, знайденим при проведенні дослідів над матеріалом у момент часу t_i .

- точка А: $\sigma_0 = \sigma(t)$, $t = 0$;
- точка Б – $\min(\sigma(t))$: $\sigma_1 = \sigma(t)$, $t = t_1$;

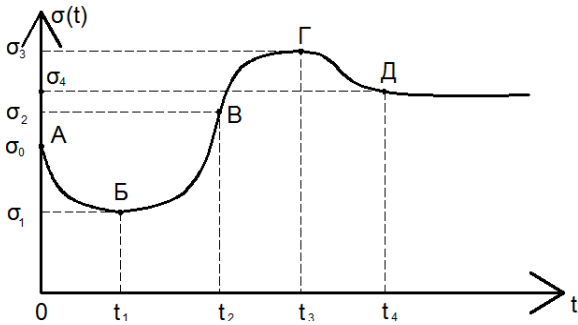


Рис. 1. Типовий графік залежності $\sigma(t)$ при врахуванні ефекту астрингації

- точка В: $\sigma_2 = \sigma(t), t = t_2$, у точці В змінюється кривина графіка;
- точка Г – $\max(\sigma(t))$: $\sigma_3 = \sigma(t), t = t_3$;
- точка Д: $\sigma_4 = \sigma(t), t = t_4$, у точці Д значення $\sigma(t)$ стабілізується й при $t > t_4$, залишається практично сталим: $\sigma(t)|_{t \rightarrow \infty} = \sigma_4$.

Модель у вигляді кубічного сплайна за t із застосуванням функцій Гевісайда $\theta(t)$ має наступний вигляд:

$$\sigma(t) = [A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3] \times [\theta(t) - \theta(t - t_4)] + \sigma_4 \cdot \theta(t - t_4), \quad (39)$$

де коефіцієнти A_0, A_1, A_2, A_3 знаходимо з наступних співвідношень за відомими для даного матеріалу експериментальними значеннями $\sigma_i(t_i), i = 0, 1, 2, 3, 4$, а саме:

$$\begin{cases} A_0 = \sigma_0; \\ A_1 = 3A_3 \cdot \left\{ t_2^2 - \frac{(t_3 - t_1)^2}{4} \right\}; \\ A_2 = -3 \cdot A_3 \cdot t_2; \\ A_3 = \frac{\sigma_3 - \sigma_0}{3t_3 \left\{ t_2^2 - \frac{(t_3 - t_1)^2}{4} \right\} - 3t_2 t_3^2 + t_3^3}. \end{cases} \quad (40)$$

Можна визначити A_0, A_1, A_2 та A_3 з наступних співвідношень:

$$\begin{cases} A_0 = \sigma_0; \\ A_1 \cdot t_1 + A_2 \cdot t_1^2 + A_3 \cdot t_1^3 = \sigma_1 - \sigma_0; \\ A_1 \cdot t_2 + A_2 \cdot t_2^2 + A_3 \cdot t_2^3 = \sigma_2 - \sigma_0; \\ A_1 \cdot t_3 + A_2 \cdot t_3^2 + A_3 \cdot t_3^3 = \sigma_3 - \sigma_0. \end{cases} \quad (41)$$

По суті, система лінійних рівнянь (41) відносно коефіцієнтів A_0, A_1, A_2 та A_3 може бути легко розв'язана, наприклад, за допомогою правила Крамера. Принаймні, розрахунок коефіцієнтів

A_1, A_2, A_3 за цим алгоритмом може бути перевіркою значень, отриманих для цих самих коефіцієнтів зі співвідношень (40).

Дослідимо далі механічні закономірності, зокрема, поведінку в'язкопружних дисперсних систем в умовах тепломасообміну з використанням і вдосконаленням результатів робіт [1-5, 17, 21].

Для спадкових співвідношень БВ (1п, 1р) ядро повзучості $K(t, \tau)$ будемо вважати вираженням:

$$K(t, \tau) = \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(\tau), \quad (42)$$

де $\varphi_1(t), \varphi_2(\tau)$ – у загальному вигляді довільні додатні функції часу. Такий вибір ядр $K(t, \tau)$ у принципі звужує теорію, але завдяки довільності функцій φ_1 й φ_2 може охоплювати широкий спектр варіантів. Зокрема, для врахування вище розглянутих ефектів астрингації можна використати наступний вигляд $K(t, \tau)$:

$$K(t, \tau) = \kappa_1 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot (t-\tau)}, \quad (43)$$

де κ_1, α_1 – параметри, що визначаються з експериментальних результатів досліджень зразків конкретних дисперсних матеріалів. Тому для $\varphi_1(t)$ і $\varphi_2(t)$ маємо:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = \xi_1 \cdot e^{-\alpha_1 t}; \\ \varphi_2(\tau) = \xi_2 \cdot e^{\alpha_1 \tau}; \\ \xi_1 \cdot \xi_2 = \kappa_1. \end{cases} \quad (44)$$

Зручно ввести дві нові функції $\eta(t)$ й $L(t)$ за формулами:

$$\begin{aligned} \eta(t) &= \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t), \\ L(t) &= -\frac{d}{dt} \{ \ln[\varphi_1(t)/\varphi_1(t_0)] \}. \end{aligned} \quad (45)$$

При цьому для ядр повзучості та релаксації неважко отримати:

$$K(t, \tau) = \eta(\tau) \cdot e^{-\int_{\tau}^t L(\theta) d\theta}, \quad (46)$$

$$R(t, \tau) = \eta(\tau) \cdot e^{-\int_{\tau}^t [L(\theta) + \eta(\theta)] d\theta}. \quad (47)$$

Тоді спадкові співвідношення (1п, 1р) з ядрами (46), (47) еквівалентні крайовій задачі Коші (КЗК):

$$\left\{ \frac{d}{dt} + L(t) \right\} \cdot \varepsilon_t = \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) + \eta(t) \right\} \frac{\sigma(t)}{E}, \quad (48)$$

$$\varepsilon(t_0) = \sigma(t_0)/E. \quad (49)$$

Якщо розв'язується КЗК для $\varepsilon(t)$ за даною $\sigma(t)$, або ж КЗК для $\sigma(t)$ за даною $\varepsilon(t)$, тоді слід вирішити еволюційну КЗК типу (у матричній формі):

$$\frac{dy}{dt} + \Lambda(t) \cdot y = I(t), \quad y(t_0) = y_0, \quad (50)$$

що відображає принцип причинності. У (50) введені наступні позначення:

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t) = [\varepsilon(t); \sigma(t)]^T; \\ \Lambda(t) = [L(t); L(t) + \eta(t)]^T; \\ y(t_0) = [\varepsilon(t_0); \sigma(t_0)]^T; \\ I(t) = \left[\begin{array}{l} \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) + \eta(t) \right\} \cdot \frac{\sigma(t)}{E}; \\ E \cdot \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) \right\} \cdot \varepsilon(t) \end{array} \right]^T; \\ y_0 = [\sigma(t_0)/E; E \cdot \varepsilon(t_0)]^T, \end{array} \right. \quad (51)$$

де M^T означає операцію транспонування конкретної матриці M .

Розв'язок рівнянь (50) і (51) має вигляд:

$$y(t) = y_0 \cdot e^{-\int_{t_0}^t \Lambda(\theta) d\theta} + \int_{t_0}^t e^{-\int_{\tau}^t \Lambda(\theta) d\theta} I(\tau) d\tau. \quad (52)$$

Зазвичай, $t_0 \equiv 0$, тому у подальшому будемо притримуватись саме цього значення t_0 .

Відповідно до формули (52) час релаксації процесу повзучості τ_n й час релаксації процесу релаксації напруження τ_p , відповідно, можуть бути визначені за формулами:

$$\tau_n = 1/\bar{\Lambda}_n, \quad \tau_p = 1/\bar{\Lambda}_p, \quad (53)$$

де $\bar{\Lambda}_n$ й $\bar{\Lambda}_p$ – середні значення функцій

$$\Lambda_n(t) = L(t), \quad \Lambda_p(t) = L(t) + \eta(t), \quad (54)$$

відповідно, на інтервалах $t \in [0, \tau_n]$ й $[0, \tau_p]$, що визначаються умовами нормування:

$$\int_0^{\tau_n} \Lambda_n(\theta) d\theta = 1, \quad \int_0^{\tau_p} \Lambda_p(\theta) d\theta = 1. \quad (55)$$

Фізичний зміст ведених вище величин такий. Змінний коефіцієнт повзучості (в'язкість) $\eta(t)$ визначає величину спадкових ефектів (їхню амплітуду), а функція $\Lambda_n(t)$ й $\Lambda_p(t)$ (так звані еволюти) – темп відповідних процесів релаксації, тобто наскільки швидко вони відбуваються в часі.

Введемо позначення:

$$\tilde{\Lambda}(t) = [\Lambda_n(t); \Lambda_p(t)]^T. \quad (56)$$

Для матеріалів, повзучість яких зростає й прискорюється при зволоженні та нагріванні, природно покласти:

$$\partial \tilde{\Lambda} / \partial m \geq 0, \quad \partial \tilde{\Lambda} / \partial T \geq 0. \quad (57)$$

При цьому вважається, що обидві еволюти $\Lambda_n(t)$ й $\Lambda_p(t)$ залежать від часу через температуру «робочого тіла» $T(t)$ й масу вологи $m(t)$ в ньому:

$$\tilde{\Lambda}(t) = \tilde{\Lambda}[T(t); m(t)]. \quad (58)$$

Природно прийняти також, що:

$$\partial \eta / \partial m \geq 0, \quad \partial \eta / \partial T \geq 0. \quad (59)$$

Зрозуміло, що при моделюванні з тих чи інших міркувань функцій $\eta(t)$ та $L(t)$ (45), слід враховувати умови (57), (58) і (59).

Основні термодинамічні співвідношення при сушінні стрижня. Розглянемо далі основні термодинамічні співвідношення стосовно задачі сушіння стрижня. Так, перший закон термодинаміки можна записати у вигляді:

$$\delta Q = dU + \delta A - \mu \cdot dm, \quad (60)$$

де δQ – загальна кількість теплоти наданого стрижню (за час dt); dU – зміна внутрішньої енергії стрижня (за час dt); δA – механічна робота стрижня (за час dt); μ – питомий хімічний потенціал речовини стрижня; dm – маса вологи, яка випаровується зі стрижня (за час dt).

З урахуванням низки загальних модельних співвідношень, перетворимо вираз (60) у «робоче» рівняння, яке разом з формулами (48) і (49)

може бути покладене в основу теорії розглянутого процесу.

Для кількості теплоти $\delta\tilde{Q}$ яке надійшло стрижню за час dt , приймаємо відомий закон Ньютона-Ріхмана:

$$\delta\tilde{Q} = f(t) \cdot [T_c - T(t)]dt, \quad (61)$$

де T_c – температура навколишнього середовища, яке оточує стрижень; $T(t)$ – температура вологого тіла у момент часу t ; $f(t)$ – інтегральний (що відноситься до всієї поверхні) коефіцієнт теплообміну.

Залежність коефіцієнта $f(t)$ від часу t обумовлена зміною фізичних властивостей примежового прошарку тіло-середовище під час висихання тіла [22].

Розглядається достатньо повільний (квазістаціонарний) процес конвективного сушіння тонкого дисперсного тіла, що протікає за умов:

- при постійній температурі навколишнього середовища ($T_c = const$);
- ізометричності ($l = const$, l – фіксована довжина розтягнутого стрижня);
- наявності незначних градієнтів температури та вологості по товщині стрижня, якими можна знехтувати

Тоді є прийнятими міркування, викладені нижче. За конвективного сушіння винесення маси з поверхні тіла можливе тільки у вигляді пари, тобто при $\varepsilon_{cp} = 1$, де ε_{cp} – критерій фазового перетворення [23]. Тому зміна середнього значення утримуваної маси тіла \tilde{U} можлива тільки за рахунок випаровування, а перенесення маси в середині тіла у вигляді рідини (що відповідає $\varepsilon_{cp} < 1$) призводить тільки до перерозподілу утримуваної маси всередині тіла при $\tilde{U} = const$. За таких умов вологе тіло обмінюється з навколишнім середовищем двома основним каналами [24]:

- 1) кондуктивний (теплопровідність крізь примежовий прошарок тіло – середовище);
- 2) перенесенням теплоти з парами вологи (тобто, разом перенесенням маси).

Отже, $\delta\tilde{Q}$ відповідає за кондуктивний теплообмін.

Кількість теплоти, яка надійшла до тіла у зв'язку з процесом перенесення маси $\delta\tilde{Q}$ ($\delta\tilde{Q} < 0$ при випаровуванні) визначається з наступного співвідношення:

$$\delta\tilde{Q} = r(t) \cdot dm, \quad (62)$$

де $r(t)$ – питома теплота випаровування вологи.

По суті $\delta\tilde{Q}$ описує процес теплообміну тіла з середовищем, пов'язаний з випаровуванням вологи. Формула (62) визначає кількість поглиненої (або відданої) теплоти при фазовому переході рідини у пару.

Отже, загальна кількість теплоти δQ визначатиметься виразом:

$$\delta Q = \delta\tilde{Q} + \delta\tilde{Q} = f(t) \cdot [T_c - T(t)] \cdot dt + r(t)dm. \quad (63)$$

Таким чином, автори [21], посилаючись на [4], по суті, ототожнюють питомий хімічний потенціал $\mu(t)$ з питомою теплотою пароутворення $r(t)$ спочатку вільної, а потім і зв'язаної вологи, тобто $\mu(t) = r(t)$.

Слід зазначити [24], що при взаємодії капілярно-пористих тіл з вологою відбувається зміна їхніх структурних і фізико-механічних властивостей. Ці зміни викликані молекулярним характером зв'язку рідини, що поглинається, з речовиною дисперсного тіла. Крім того, перенесення рідини або пари всередину холодного капілярно-пористого тіла залежить від характеру молекулярного зв'язку рідини, яка утримується в тілі, з твердою фазою тіла. Тому властивості матеріалів щодо вологообміну визначають їхню здатність віддавати (або поглинати) вологу й вирішальним чином впливають на кінетику процесів сушіння та зволоження.

У сучасній фізико-хімічній термодинаміці найбільшого розповсюдження набула класифікація форм зв'язку вологи з дисперсними тілами, запропонована П.А. Ребіндером [25]. У основі цієї класифікації лежить термодинамічний критерій оцінки вологообмінних властивостей за величиною енергії зв'язку вологи з матеріалом, тобто за величиною вільної енергії ізотермічного видалення з матеріалу одиниці маси зв'язаної вологи.

Зменшення вільної енергії ΔF при постійній температурі або енергії зв'язку, яка дорівнює роботі відриву одного моля води від матеріалу (без зміни складу), можна визначити за формулою [24]:

$$\begin{aligned} \mu &= -\Delta F = RT \cdot \ln(P_n/P_0) = \\ &= RT \cdot \ln(1/\varphi) = -RT \cdot \ln(\varphi), \end{aligned} \quad (64)$$

де μ – питомий хімічний потенціал речовини, R – універсальна газова стала, T – температура тіла, P_n – тиск насиченої пари вільної води,

$P_{\bar{U}}$ – парціальний тиск рівноважної пари над матеріалом з умістом вологи \bar{U} – у будь-якому середовищі, $\varphi = P_U / P_n$ – відносна вологість середовища, у якому знаходиться матеріал).

Згідно з рівнянням Гіббса-Гельмгольца, зміну внутрішньої енергії (енергії ізотермічного процесу) або теплоти дисоціації зв'язаної води можна подати наступним чином [22]:

$$\Delta I = \Delta F - T \cdot \frac{\partial(\Delta F)}{\partial T}. \quad (65)$$

У формулі (65) врахована залежність $\Delta F = \Delta F(T)$. Насправді, $\Delta F = \Delta F(T, \varphi)$. Тому в рівнянні (65) фігурує частинна похідна ΔF за T . Тоді диференціюємо рівняння (64) за T з урахуванням залежності (65) і знаходимо:

$$Q^* = RT^2 \left\{ \frac{\partial(\ln(P_{\bar{U}}))}{\partial T} - \frac{\partial(\ln(P_n))}{\partial T} \right\} = Q_1(\bar{U}) - Q_0. \quad (66)$$

де $Q_1(\bar{U})$ – теплота випаровування води з матеріалу за даного значення вологовмісту \bar{U} , Q_0 – теплота випаровування вільної води. Інакше Q^* можна подати наступним чином:

$$Q^* = RT^2 \cdot \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial T} = -RT^2 \frac{\partial(\ln(\varphi))}{\partial T}. \quad (67)$$

Отже, загальні витрати енергії на випаровування вологи або повна теплота адсорбції $\tilde{Q}_{\text{повна}}$ визначається як сума питомої теплоти випаровування вільної води r_0 , теплоти, витраченої на подолання енергії зв'язку вологи з матеріалом r , яка відповідає зменшенню внутрішньої енергії й теплоти, витраченої на подолання ентропійного зв'язку [24]:

$$\tilde{Q}_{\text{повна}} = r_0 - r + T \cdot \Delta S', \quad (68)$$

де $\Delta S'$ – зміна ентропії системи «тіло – навколишнє середовище», куди випаровується волога.

П.А. Ребіндер виділяє три основні форми зв'язку вологи з дисперсними тілами: хімічну, фізико-хімічну та фізико-механічну [24].

Хімічний зв'язок води з матеріалом здійснюється у чітко визначених кількостях у вигляді гідроксильних іонів і молекулярних сполук типу кристалів. Зазвичай, у процесі сушіння хімічно зв'язана вода не видаляється. Вона може бути

виділена з тіла лише при високій температурі в процесі термічного розпаду дисперсного тіла. Для хімічно зв'язаної води енергія зв'язку досягає найбільшого значення (до $(6 \dots 9) \cdot 10^3$ Дж/моль).

Для процесів тепло- й масопереносу значно більший інтерес має фізико-хімічна форма зв'язку вологи. До цієї категорії відноситься адсорбована волога. Розрізняють фізичну й хімічну адсорбцію. При фізичній адсорбції зберігаються індивідуальні властивості всіх молекул, адсорбованих на зовнішній та внутрішній поверхнях дисперсного тіла. Якщо при адсорбції молекула розділяється на атоми або радикали, які зв'язуються з поверхнею окремо, кожний сам по собі, а також віддає чи отримує від поверхні електрон, то у цих випадках адсорбція зветься хімічною.

Відомо, що адсорбція на поверхні молекул з навколишнього середовища продовжується від одного до кількох молекулярних прошарків. Тому розрізняють мономолекулярну та полімолекулярну адсорбцію. При адсорбції води активними ділянками поверхні матеріалу найбільш міцно зв'язується найближчий до поверхні мономолекулярний прошарок молекул води за рахунок водневих зв'язків.

У наступних прошарках зв'язки поступово слабшають. Активними ділянками (центрами) у матеріалах (типу текстильних та ін.) є функціональні групи полімерів, гідроксильні групи аморфних ділянок целюлози та ін. До однієї функціональної групи можуть приєднуватися дві-три молекули води. Наприклад, до групи $-OH$ можуть приєднатися дві-три молекули H_2O , до групи $-OOH$ – три-чотири молекули H_2O , до групи $-CO$, COH – по дві, до групи $-H_2$ – одна [26, 27].

Процес адсорбції вологи супроводжується виділенням значної кількості теплоти. При цьому, найбільша кількість теплоти виділяється при утворенні найбільш міцно зв'язаного мономолекулярного прошарку води. У зв'язку з послабленням зв'язків у процесі утворення полімолекулярних прошарків, кількість виділеної теплоти швидко спадає до нуля.

Енергія зв'язку H_2O з дисперсним тілом та кількість адсорбованої ним вологи залежать від природи поверхні дисперсного тіла [25]. Цією особливістю фізико-хімічно зв'язана вода відрізняється від інших, енергетично більш слабких форм зв'язку вологи.

Проміжне положення між фізико-хімічно зв'язаною вологою та механічно утримуваною, згідно з П.А. Ребіндером, займає осмотично

зв'язана вода. Ця вода є вологою набухання (набрякання) гідрофільних колоїдних тіл і високомолекулярних сполук. Основною умовою утворення осмотично зв'язаної води є вибіркова дифузія вологи крізь напівпроникні оболонки осмотичних комірок. Осмотичними комірками можуть бути міцели класичних колоїдних часток або асоціати макромолекул високомолекулярних сполук. Структурна сітка високомолекулярних речовин утворює перегородки, які можуть пропускати крізь себе молекули H_2O й бути непроникними для високомолекулярних фракцій.

Дифузне проникання молекул H_2O до внутрішньої структури полімеру викликає його набрякання. Воно припиняється під дією механічних напружень, які виникають у структурній сітці тіла в процесі набрякання. Другою причиною обмеженого набрякання тіл є обмежена розчинність речовини у воді. З припиненням набрякання зволожена дисперсна система прийде у стан рівноваги при незмінних зовнішніх умовах.

У випадку необмеженого набрякання відбувається повне розчинення дисперсної фази у дисперсійному середовищі, оскільки утворюється істинний розчин. При цьому осмотично зв'язаним стає весь розчинник, про що свідчить зниження пружності насиченої пари над розчином [25].

Таким чином, кількість осмотично зв'язаної води, яка знаходиться в тілі, залежить від різниці концентрації макромолекул в асоціатах (пакетах) і в зовнішньому розчині, а також від умов, за яких настає рівновага дисперсної фази з дисперсійним середовищем. З урахуванням ентропійної природи осмотичної вологи, згідно з рівнянням Гіббса-Гельмгольца (64), ентальпія $\Delta I \rightarrow 0$, тоді

$$-\Delta F = T \cdot \Delta S = -RT \cdot \ln(n_0), \quad (69)$$

де n_0 – молярна частка H_2O в розчині.

До фізико-механічної форми зв'язку вологи відноситься волога, яка утримується у мікро – й макрокапілярах, й H_2O , що залишилась на поверхні тіла при його безпосередньому дотику до води [22].

З робіт Н.Н. Федякіна [28] випливає, що властивості води в капілярах радіусом понад $4 \cdot 10^{-8}$ м не відрізняються від властивостей вільної води. Тому вода, яка утримується в капілярах, не є зв'язаною у звичайному сенсі до тих пір, поки вплив стінок капіляра не змінить його властивості.

Зв'язок води в капілярах, радіус \tilde{r} яких бі-

льше $4 \cdot 10^{-8}$ м, формально виражається ефективною енергією зв'язку, обумовленою за законом Кельвіна залежністю пари $P_{\tilde{r}}$ над гнutoю поверхнею меніска рідини від кривини поверхні [25]:

$$P_{\tilde{r}} = P_H \cdot e^{-[2 \cdot \alpha / \tilde{r}] \cdot V_0 / (RT)}, \quad (70)$$

де V_0 – молярний об'єм, α – коефіцієнт зовнішнього теплообміну (локальний, що відноситься до одиниці площі поверхні). Шляхом заміни у формулі (64) P_H на $P_{\tilde{r}}$, визначимо енергію зв'язку капілярної вологи:

$$L_r = +2 \cdot \alpha \cdot V_0 / \tilde{r}. \quad (71)$$

Так, наприклад, енергія зв'язку H_2O в капілярі радіусом $\tilde{r} = 10^{-7}$ м ($\tilde{r} = 100$ нм) дорівнює $5,3 \cdot 10^2$ Дж/моль. Величина енергії капілярного зв'язку в умовах повного змочування не залежить від природи стінки капіляра.

Крім цих видів зв'язаної води, необхідно враховувати й вільну воду, що захоплена механічно й утримується в дисперсійній структурі (наприклад, між нитками тканини), а також заповнює капілярно-пористі тіла (особливо у випадку, повного занурення дисперсного тіла до надлишку рідини).

Отже, більшість матеріалів, що використовуються, наприклад, у легкій промисловості (зокрема, тканини) належать до групи колоїдних капілярно-пористих тіл, у яких при взаємодії з вологою відбуваються значні зміни структури.

З урахуванням формул (64), (69) і (71), для питомого хімічного потенціалу μ маємо:

$$\mu = RT \cdot \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - RT \cdot \ln(n_0) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_0}{\tilde{r}}. \quad (72)$$

На відміну від (63) з урахуванням (72) маємо:

$$\begin{aligned} \delta Q &= f(t) \cdot [T_c - T(t)] dt + \mu dm = \\ &= f(t) \cdot [T_c - T(t)] dt + \left\{ RT \cdot \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - \right. \\ &\quad \left. - RT \cdot \ln(n_0) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_0}{\tilde{r}} \right\} dm. \end{aligned} \quad (73)$$

Варіанти моделювання інших складових рівняння (60) $dU + \delta A$ будуть різними для різних задач. Для конкретності розглянемо задачу про релаксацію напружень у зволоженому стрижні при малому ($\leq 5\%$) його розтягу в умовах ізотермічного ($T_c = const$) й ізометричного ($l = const$, де l – фіксована довжина розтягнутого стрижня)

його сушіння. Ця задача є простим експериментальним втіленням [17]. Матеріал стрижня будемо вважати таким, що набрякає при зволоженні, й таким, що дає усадку при сушці. При нагріванні вважаємо матеріал розширюваним. Відповідності до цього він знаходиться під впливом прихованого видовження в процесі сушіння в результаті усадки матеріалу [21]:

$$\Delta l(t) = l - l_0(t). \quad (74)$$

Тут $l_0(t)$ – змінна довжина вільного (нерозтягнутого) стрижня, що відповідає його вологовмісту й температурі в момент часу t ; l – фіксована довжина розтягнутого стрижня.

Розтяг $\varepsilon(t)$ у цьому випадку виявляється змінним за рахунок прихованого видовження (74):

$$\varepsilon(t) = \frac{l - l_0(t)}{l_0(t)} = \frac{\Delta l(t)}{l_0(t)}. \quad (75)$$

Видовження Δl (74) зручно розкласти на дві складові: $\Delta l_0 + \Delta l_1$, де $\Delta l_0 = l - \Delta l_0(t)$ – це початкове видовження, а $\Delta l_1(t) = l_0(t_0) - l_0(t)$ – додаткове видовження за рахунок прихованої усадки матеріалу. Зрозуміло, що $\Delta l_0 = \text{const}$, і, крім того, $l_0(t) = l_0(t_0) - \Delta l_1(t)$. Звідси для $\varepsilon(t)$ за залежністю (75) неважко отримати:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta l_1(t)}{l_0(t_0) - \Delta l_1(t)} \right\}. \quad (76)$$

Тоді

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta l_1(t)}{l_0(t_0) - \Delta l_1(t)} \right] \right\} + \\ &+ \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left\{ \frac{[\Delta l_1(t)]'_t \cdot [l_0(t_0) - \Delta l_1(t)]}{[l_0(t_0) - \Delta l_1(t)]^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\Delta l_1(t) \cdot \{-[\Delta l_1(t)]'_t\}}{[l_0(t_0) - \Delta l_1(t)]^2} \right\} = \\ &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta l_1(t)}{l_0(t_0) - \Delta l_1(t)} \right] \right\} + \\ &+ \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left\{ \frac{d}{dt} \left[\frac{\Delta l_1(t) \cdot l_0(t_0)}{[l_0(t_0) - \Delta l_1(t)]^2} \right] \right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\Delta l(t)}{l_0(t_0)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta l_1(t)}{l_0(t_0) - \Delta l_1(t)} \right] \right\} + \\ &+ \frac{\Delta l(t)}{[l_0(t_0) - \Delta l_1(t)]^2} \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \Delta l_1(t) \cdot l_0(t_0) \right\}. \quad (77) \end{aligned}$$

Вважаємо, що $t_0 \equiv 0$. Тоді замість (77) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\Delta l(t)}{l_0(0)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta l_1(t)}{l_0(0) - \Delta l_1(t)} \right] \right\} + \\ &+ \frac{\Delta l(t)}{[l_0(0) - \Delta l_1(t)]^2} \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \Delta l_1(t) \cdot l_0(0) \right\}. \quad (78) \end{aligned}$$

Оскільки $\Delta l(t) = l - l_0(t)$ та $\Delta l_1(t) = l_0(0) - l_0(t)$, з рівняння (78) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{-l_0(t)}{l_0(0)} \cdot \left[1 + \frac{l_0(0) - l_0(t)}{l_0(t)} \right] \right\} + \\ &+ \frac{(l - l_0(t)) \cdot \frac{d}{dt} \{-l_0(t)\}}{[l_0(t)]^2} = \\ &= - \frac{d}{dt} \left\{ \frac{l_0(t)}{l_0(0)} \cdot \frac{l_0(0)}{l_0(t)} \right\} - \\ &- \frac{d}{dt} \left\{ \frac{l_0(t) \cdot (l - l_0(t))}{[l_0(t)]^2} \right\} = \\ &= \frac{-d}{dt} \left\{ \frac{l_0(t)}{l_0(t)} \right\} - \\ &- \frac{d}{dt} \left\{ \frac{l_0(t) \cdot (l - l_0(t))}{[l_0(t)]^2} \right\} = \\ &= - \frac{d}{dt} \left\{ l_0(t) \right\} \times \\ &\times \left[\frac{1}{l_0(t)} + \frac{l}{[l_0(t)]^2} - \frac{1}{l_0(t)} \right] = \\ &- \frac{d}{dt} \left\{ l_0(t) \right\} \cdot \frac{l}{[l_0(t)]^2}. \quad (79) \end{aligned}$$

Отже, остаточно:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}\left\{\frac{l_0(t)}{l_0(t)^2}\right\} \cdot l = \frac{d}{dt}\left\{\frac{l}{l_0(t)}\right\}. \quad (80)$$

Цей результат можна було б отримати одразу з (75):

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{l - l_0(t)}{l_0(t)} = \left\{\frac{l}{l_0(t)} - 1\right\} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left\{\frac{l}{l_0(t)}\right\}. \end{aligned} \quad (81)$$

Вирази (80) й (81) означають, що $\varepsilon(t)$ є фактично відношенням фіксованої довжини розтягнутого стрижня (l) до змінної довжини вільного (не розтягнутого) стрижня, що відповідає його вологовмісту й температурі в момент часу t мінус 1. Відповідно, з цього визначення $\varepsilon(t)$ для $d\varepsilon(t)/dt$ маємо похідну за часом t від дробу $[l/l_0(t)]$. Адже похідна за t від мінус 1 тотожна нулю. Отже, у подальшому, у рівняннях, де фігурує множник або член, $d\varepsilon(t)/dt$, під цим виразом розуміємо (80).

Оскільки розглядається ізометричне ($l = \text{const}$) сушіння стрижня, механічна робота дорівнює нулю:

$$\delta A = 0. \quad (82)$$

Зміна внутрішньої енергії стрижня dU обумовлена трьома факторами:

- а) прогріванням (змінною температурою) $C_\varepsilon(t)dT$;
- б) усадкою матеріалу (прихованим розтягом) $V \cdot \sigma \cdot d\varepsilon$;
- в) дисипацією енергії внаслідок релаксації напружень $V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot d\sigma$.

Отже, маємо:

$$\begin{aligned} dU &= C_\varepsilon(t) \cdot dT + V \cdot \sigma \cdot d\varepsilon + \\ &+ V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot d\sigma, \end{aligned} \quad (83)$$

де $D(t)$ – це безрозмірний коефіцієнт дисипації, що відображає відповідні властивості матеріалу стрижня, V – об'єм стрижня.

Підстановка виразів (61), (82), (83) у (60) з урахуванням формули (72) для μ дає наступне рівняння після віднесення усіх величин до одиниці часу dt :

$$f(t) \cdot \{T_c - T(t)\} = C_\varepsilon(t) \cdot \frac{dT}{dt} +$$

$$\begin{aligned} &+ V \cdot \sigma \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot \frac{d\sigma}{dt} - \\ &- \left\{RT \cdot \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - RT \cdot \ln(n_o) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_0}{\tilde{r}}\right\} \times \\ &\times \frac{dm}{dt}. \end{aligned} \quad (84)$$

Для зручності замінюємо відлік (точки відліку) температури T й уводимо $\Delta T(t) = T(t) - T_c$. З урахуванням рівняння (80):

$$\begin{aligned} &C_\varepsilon(t) \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + f(t) \cdot \Delta T = \\ &= \left\{RT \cdot \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - RT \cdot \ln(n_o) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_0}{\tilde{r}}\right\} \times \\ &\times \frac{dm}{dt} - V \cdot \sigma \cdot \frac{d}{dt}\left\{\frac{l}{l_0(t)}\right\} - \\ &- V \cdot D(t) \cdot \varepsilon \cdot \frac{d\sigma}{dt}. \end{aligned} \quad (85)$$

Рівняння (85) разом з (48) і (49) утворюють вихідну систему рівнянь, яка описує взаємно пов'язані процеси релаксації напружень у матеріалі стрижня (при його сушці) та його (стрижня) тепломасообмін з навколишнім середовищем. Ця система в принципі дозволяє визначити будь-яку пару з трьох величин $\Delta T(f)$, $m(t)$, $\varepsilon(t)$ при заданій третій.

Додатково врахуємо, що розтяг $\varepsilon(t)$ визначається зміною температури $T(t)$ й вологовмісту стрижня (ці залежності входять у визначення функції $l_0(t)$). Також змодельуємо відповідну залежність (для $l_0(t)$). Тоді замість трьох величин $\Delta T(f)$, $m(t)$, $\varepsilon(t)$ у рівняннях (48) й (85) виявляться тільки дві: $\Delta T(f)$, $m(t)$, які будуть вже однозначно визначатися коефіцієнтними функціями рівнянь (48) та (85) й початковими умовами (49).

Система (48) і (85) прийнятна для визначення будь-яких двох коефіцієнтів (параметрів цих рівнянь) за заданих інших величин, тобто для розв'язування обернених задач, які опосередковано визначають фізичні величини, що важко доступні для прямих вимірювань.

Аналіз отриманих рівнянь. Розглянемо далі можливі варіанти модельних співвідношень для $\Lambda(t)$, $\varepsilon(t)$ тощо, а також деякі загальні наслідки з основної системи рівнянь (48) і (85) з початковими умовами типу (49).

Наведемо деякі додаткові міркування та висновки. Основна система рівнянь (48) і (85) буде

доволі конструктивною після того, як будуть змодельовані або табульовані коефіцієнти функцій, що входять до неї, та інші величини.

Найпростішим прикладом реалізації умов (57) можна обрати модельний вираз [21] у вигляді:

$$\tilde{\Lambda}(t) = \tilde{\Lambda}_o + \theta(t - t_y) \times \left\{ 1 - e^{-\bar{\alpha}\{T(t)-T(t_y)\}-\beta\{m(t)-m(t_y)\}} \right\} \cdot \tilde{\Lambda}^*, \quad (86)$$

де всі константи $\tilde{\Lambda}_o$, $\tilde{\Lambda}^*$, $\bar{\alpha}$ та β – додатні. Тут маються на увазі обидві еволюти Λ_n й Λ_p (кожна зі своїми параметрами) з урахуванням співвідношення $\eta(t) = \Lambda_p - \Lambda_n$ за умов (59). Крім умов (57), вираз (86) відображає релаксаційний характер зміни еволюти $\Lambda(t)$, що типово для процесів, які ведуть систему до рівноваги.

Якщо обмежитися лінійним наближенням, будемо мати:

$$\tilde{\Lambda}(t) = \tilde{\Lambda}_o + \theta(t - t_y) \times \left\{ a \cdot [T(t) - T(t_y)] + b[m(t) - m(t_y)] \right\}, \quad (87)$$

де $a = d\tilde{\Lambda}/dT \geq 0$; $b = d\tilde{\Lambda}/dm \geq 0$, t_y – момент, коли в матеріалі виникають процеси усадки.

Зрозуміло, що порівняння підходу, який розглядається, з експериментом слід розпочинати з лінійного варіанта (87). Лише у випадку невдачі слід ускладнювати теорію. У лінійному наближенні можна також покласти:

$$E(t) = \theta(t - t_y) \cdot \left\{ C_1[T(t) - T(t_y)] + C_2 \cdot [m(t) - m(t_y)] \right\}. \quad (88)$$

Звідси:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \theta(t - t_y) \times \left\{ C_1 \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} - C_2 \cdot \frac{dm}{dt} \right\}, \quad (89)$$

де C_1 й C_2 – константи (параметри теорії). Якщо в лінійному наближенні покласти:

$$E(t) = \theta(t - t_y) \cdot \left\{ \tilde{C}_1[T(t) - T(t_y)] + \tilde{C}_2 \cdot [m(t) - m(t_y)] \right\}, \quad (90)$$

тоді матимемо

$$\frac{dE(t)}{dt} = \theta(t - t_y) \times \left\{ \tilde{C}_1 \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} - \tilde{C}_2 \cdot \frac{dm}{dt} \right\}. \quad (91)$$

Така підстановка (89) або (91) зменшує число шуканих функцій з трьох (ΔT , m , ε) до двох (ΔT , m) за числом рівнянь (48), (85) системи. Якщо не розглядати відповідну таким апроксимаціям систему (48) і (85) у цілому, можна обмежитися підстановкою виразу (91) до рівняння (85):

$$\left\{ C_\varepsilon(t) + \theta(t - t_y) \cdot C_3 \cdot V \cdot \sigma \right\} \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + f(t) \cdot \Delta T(t) = \left\{ RT \cdot \ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - RT \cdot \ln(n_o) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_o}{\tilde{r}} - \theta(t - t_y) \cdot C_4 \cdot V \cdot \sigma \right\} \cdot \frac{dm}{dt} - V \cdot D(t) \cdot E(t) \cdot \frac{d\sigma}{dt}, \quad (92)$$

де $C_3 \equiv \tilde{C}_1$, $C_4 \equiv \tilde{C}_2$.

Звідси видно, що деформація (у тому числі усадка) призводить до ефективної зміни теплоємності й питомого хімічного потенціалу:

$$C_\varepsilon \rightarrow C_\varepsilon(t) + \theta(t - t_y) \cdot C_\varepsilon \cdot M \cdot \sigma, \quad \mu(t) \rightarrow \mu(t) - \theta(t - t_y) \cdot C_4 \cdot V \cdot \sigma. \quad (93)$$

Цей результат було отримано експериментально в роботі [29] для теплоємності та складової $\mu(t)$ – питомої теплоти пароутворення $r(t)$. Це слугує певним підтвердженням правомірності наведених вище міркувань. Слід також зазначити, що видозмінені міркування відносно складових dU та δA можуть привести до тієї ж системи рівнянь (48) і (85) і у випадку, коли $\varepsilon(t)$ не прихований розтяг, а явний (тобто довжина l зразка не фіксована).

Для зручності нижче наведена повна універсальна система рівнянь для (ΔT , m) з урахуванням залежностей (90) і (91):

$$\left\{ \begin{aligned} & [C_\varepsilon(t) + \theta(t - t_y) \cdot \tilde{C}_1 \cdot V \cdot \sigma(t)] \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \\ & + f(t) \cdot \Delta T(t) = \left\{ RT \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{\varphi}\right) - \ln(n_0) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{2 \cdot \alpha \cdot V_0}{\tilde{r}} - \theta(t - t_y) \cdot \tilde{C}_2 \cdot V \cdot \sigma(t) \right\} \times \\ & \times \frac{dm}{dt} - V \cdot D(t) \cdot \left\{ \theta(t - t_y) [\tilde{C}_1 \cdot (T(t) - \right. \\ & \left. - T(t_y)) + \tilde{C}_2 [m(t) - m(t_y)]] \right\} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt}; \\ & \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) \right\} \left\{ \theta(t - t_y) \cdot \left[\tilde{C}_1 \cdot (T(t) - \right. \right. \\ & \left. \left. - T(t_y)) + \tilde{C}_2 [m(t) - m(t_y)] \right] \right\} = \\ & = \left\{ \frac{d}{dt} + L(t) + \eta(t) \right\} \frac{\sigma(t)}{E}; \\ & \eta(t) = \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t); \\ & L(t) = -\frac{d}{dt} \left\{ \ln[\varphi_1(t)/\varphi_2(t_0)] \right\}; \\ & \varphi_1(t) = \xi_1 \cdot e^{-\alpha_1 t}; \\ & \varphi_2(t) = \xi_2 \cdot e^{\alpha_1 t}; \\ & \sigma(0)/E = \theta(t_0 - t_y) \cdot \left\{ \tilde{C}_1 \cdot (T(t_0) - \right. \\ & \left. - T(t_y)) + \tilde{C}_2 (m(t_0) - m(t_y)) \right\}. \end{aligned} \right. \quad (94)$$

Висновки. Побудована в даній роботі універсальна система рівнянь описує взаємний вплив тепломасообмінних і деформаційних процесів у дисперсних системах (у формі невеликих стрижнів, смуг, стрічок тощо) при їхньому одноосьовому навантаженні, а також прихованому або явному розтягу. Проведений попередній якісний аналіз отриманої в даній роботі системи рівнянь дає підстави рекомендувати її для практичного застосування.

Перспективи подальших досліджень. Отримані в даній роботі результати можуть бути в подальшому використані також для уточнення й удосконалення існуючих інженерних методів розрахунку систем формування мікроклімату музейних приміщень для запобігання деформаційних явищ у полімерно-дисперсних експозиційних експонатах як на стадіях проектування або конструювання відповідних технічних систем, так і в режимах реальної експлуатації останніх. Це дозволить мінімізувати старіння та деградацію музейних експонатів.

Література

1. Роботнов Ю. И. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. И. Роботнов. – Москва: Наука, 1977. – 400 с.
2. Уржумцев Ю. С. Прогностика деформативности полимерных материалов / Ю. С. Уржумцев, Р. Д. Максимов. – Рига: Зинатне, 1975. – 280 с.
3. Уржумцев Ю. С. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов / Ю. С. Уржумцев, И. И. Черский // Механика композитных материалов. – 1985. – № 4. – с.708-714.
4. Лыков А.В. Теория сушки / А.В.Лыков. – Москва: Наука, 1968. – 350 с.
5. Boltzmann L. Zur. Theorie der elastischen Nachwirring. / L. Boltzmann // Annalen der Physik. – Vol. 241. – Iss. 11, 2006
6. Ильюшин А. А. Основы математической теории термовязкоупругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. – Москва: Наука, 1970. – 480 с.
7. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация / М. А. Колтунов. – Москва: Высшая школа, 1976. – 277с.
8. Ржаницын А. Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени / А. Р. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1949. – 160 с.
9. Колтунов М. А. Анализ ползучести ортотройного стеклопластика / М. А. Колтунов, В. Н. Безухов // Вестник Московского университета. Серия: Математика и механика. – 1963. – № 6.
10. Колтунов М. А. К вопросу выбора ядер при решении задач с учетом ползучести и релаксации / М.А.Колтунов // Механика полимеров. – 1966. – № 4. – с.483-497.
11. Leaderman H. Elastic and Crup. Properties of Filamentous and other High Nolymers / H. Leaderman. – Washington: Textile Foundation, 1993. – 380p.
12. Колтунов М. А. Метод упругих решений задач термовязкоупругости / М. А. Колтунов // Механика полимеров. – 1970. – № 4.
13. Уржумцев Ю. С. Влаво-временная аналогия / Ю. С. Уржумцев // Механика полимеров. – 1972. – № 5. – с. 780-786 .
14. Колтунов М. А. К вопросу построения нелинейных соотношений термовязкоупругости / М. А. Колтунов // Механика полимеров – 1967. – № 6.
15. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров / Д. Ферри // Москва: ИЛ, 1963. – 400 с.
16. Уржумцев Ю. С. Прогностика деформативности процессов разрушения полимерных материалов / Ю. С. Уржумцев // Механика полимеров. – 1975. – № 3. – с. 498-514.
17. Луцык Р. В. Релаксация напряжений в полимерных материалах при их тепло- и массообмене со средой /

- Р. В. Луцык, Ю. Л.Ментковский, В. П.Холод // Известия вузов. Технология легкой промышленности 1986. – № 4. – с. 57-60.
18. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – Москва: Мир, 1974. – 376 с.
19. Луцык Р. В. Влияние влаги на релаксационные свойства и остаточную деформацию дублированных тканей для верха обуви / Р. В. Луцык, Н. Е. Хомяк // КОП. – 1985. – № 1. – с. 53-55.
20. Луцык Р. В. Влияние влаги на релаксационные свойства шерстяных тканей различной сложности / Р. В. Луцык, О. С. Слюсаренко, А. П. Шевченко // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 1981. – № 2. – с. 14-17.
21. Луцык Р. В. К теории вязкоупругости дисперсных систем в условиях тепломассообмена / Р. В. Луцык, Ю. Л.Ментковский, В. П.Холод // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т 58, № 4. – с. 655-660.
22. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В Лыков. – Москва: Высшая школа, 1967. – 599 с.
23. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В Лыков, Ю. А.Михайлов. – Москва; Ленинград: ГЭИ, 1963. – 533 с.
24. Луцык Р. В. Тепломассообмен при обработке текстильных материалов / Р. В. Луцык, Э. С.Малкин, И. И. Абаржи. – Киев: Наукова думка. – 1993. – 344 с.
25. Ребиндер П. А. О формах связи влаги с материалом в процессе сушки и улучшения качества материалов / П.А.Ребиндер. – Москва: Профиздат, 1958. – 14 с.
26. Ван Кревелен Д. В. Свойства и химическое строение полимеров / Д. В. Ван Кревелен. – Москва: Химия, 1976. – 415 с.
27. Чесунов В. М. Оптимизация процессов сушки в легкой промышленности / В. М. Чесунов, А. А. Захарова. – Москва: Легпромбытиздат, 1985. – 112 с.
28. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярнопористых телах / А. В Лыков. – Москва: Изд. техн.-теор. лит., 1954. – 297 с.
29. Луцык Р. В. Разработка методов изучения, анализ взаимосвязи и прогнозирование тепломассообменных и физико-механических свойств текстильных и кожно-обувных материалов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. / Луцык Р. В. – Москва, 1988. – 48 с.

References

1. Robotnov Y. I. *Elementy nasledstvennoi mekhaniki tverdykh tel*. Nauka, 1977.
2. Urzhumtsev Y. S., Maksimov R. D. *Prognostika deformativnosti polimernykh materialov*. Zinatne, 1975.
3. Urzhumtsev Y.S., Cherskiy I.I. “Naychnye osnovy inzhenernoi klimatologii polimernykh i kompozitnykh materialov.” *Mekhanika kompozitnykh materialov*, no.5, 1985.
4. Lykov A. V. *Teoriya sushki*. Nauka, 1968.
5. Boltzmann L. “Zur. Theorie der elastischen Nachwirring.” *Annalen der Physik*, vol. 241, Iss. 11, 2006.
6. Pliushyn A. A., Pobedrya B. E. *Osnovy matematicheskoi teorii*. Nauka, 1970.
7. Koltunov M. A. *Polzuchest i relaxatsiia*. Vysshaya shkola, 1976.
8. Rzhantsyn A.R. *Nekotorye voprosy mekhaniki sistem, deformiruiuschihsya vo vremeni*. Stroyizdat, 1949.
9. Koltunov M. A., Bezukhov V. N. “Analiz polzuchesti ortotropnogo stekloplastika.” *Vestnik Moskovskogo universyteta. Seriya: Matematika i mekhanika*, 1963, no. 6.
10. Koltunov M. A. “K voprosu vybora yader pri reshenii zadach s uchetom polzuchesti i relaksatsyi.” *Mekhanika polimerov*, no. 4, 1966, pp. 483-497.
11. Leaderman H. *Elastic and Crup. Properties of Filamentous and other High Nolymer*. Washington: Textile Foundation, 1993.
12. Koltunov M.A. “Metod uprugikh resheniy zadach termovyazkouprugosty.” *Mekhanika polimerov*, no. 4, 1970.
13. Urzhumtsev Y.S. “Vlago-vremennaya analogiia.” *Mekhanika polimerov*, no. 5, 1972, pp. 780-786.
14. Koltunov M.A. “K voprosu postroeniia nelineinykh sootnosheniy termoviazkouprugosty.” *Mekhanika polimerov*, no. 6, 1967.
15. Ferry D. *Viazkouprugie svoystva polimerov*. IL, 1963.
16. Urzhumtsev Y. S. “Prognostika deformativnosti protsessov razrusheniia polimernykh materialov.” *Mekhanika polimerov*, no. 3, 1975, pp. 498-514.
17. Lutsyk R. V., Mentkovskiy Y. L., Kholod V. P. “Relaxatsiia napriazheniy v polimernykh materialakh pri ih teplo – i masoobmene so sredoy.” *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti*, no. 4, 1986, pp. 57-60.
18. Kristensen R. *Vvedenie v teoriiu viazkouprugosti*. Mir, 1974.
19. Lutsyk R. V., Khomiak N. E. “Vliiani'e vlagi na relaksatsionnye svoystva i ostatochnuu defarmatsiiu dublirovannykh tkaney dlia verkha obuvi.” *KOP*, no. 1, 1985, pp. 53-55.
20. Lutsyk R. V., Sliusarenko O. S., Shevchenko A. P. “Vliianie vlagi na relaksatsionnye svoystva sherstianykh tkaney razlichnoy slozhnosti.” *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti*, no. 2, 1981, pp. 14-17.
21. Lutsyk R.V., Mentkovskiy Y. L., Kholod V. P. “K teorii viazkouprugosti dispersnykh sistem v usloviakh teplo masoobmena.” *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, vol., no. 4, 1990, pp. 655-660.
22. Lykov A. V. *Teoriia teploprovodnosti*. Vysshaya shkola, 1967.
23. Lykov A. V., Mikhailov Y. A. *Teoriia teplo- i masoperenosa*. GEI, 1963.

24. Lutsyk R. V., Malkin E. S., Abarzhy I. I *Teplomassoobmen pri obrabotke tekstilnykh materialov*. Naukova dumka, 1993.
25. Rebinder P.A. *O formakh svyazi vlazi s materialom v protsesse sushki i uluchsheniia kachestva materialov*. Profizdat, 1958.
26. Van Krevelen D. V. *Svoistva i khimicheskoe stroenie polimerov*. Khimiia, 1976.
27. Chesunov V. M., Zakharova A. A. *Optimizatsiia protsessov sushki v legkoi promishlennosti*. Legprombytizdat, 1985.
28. Lykov A. V. *Yavleniia perenosa v kapliarnoporistikh telakh*. Izd. tekhn.-teor. lit., 1954.

29. Lutsyk R.V. *Razrabotka metodov izucheniia, analiz vzaimosvyazi i prognozirovanie teplomasoobmennykh i fiziko-mekhanicheskikh svoystv tekstilnykh i kozhevno obuvnykh materialov*. Diss. abstract. Moskva, 1988.

УДК 539.3(075)

Концептуальные основы анализа тепломассообменных и деформационных процессов в полимерных дисперсных телах для формирования микроклимата музеев

В.Б. Довгалюк¹, Ю.В. Човнюк²

¹к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, tgsiv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, uchovnyuk@ukr.net

Аннотация. Для хранения музейных экспонатов, среди которых полимерные дисперсные, необходимо обеспечить параметры микроклимата, максимально замедляющие старение и деградацию. Используя теорию Больцмана-Вольтерры, первый закон термодинамики для открытых систем и метод определения параметров функций влияния, обоснована адекватная физико-механическая модель, описывающаяся системой дифференциальных уравнений для анализа теплообменных и деформационных процессов в дисперсных материалах. Показано, что при исследовании влияния теплоты и влаги на деформационные свойства полимерных материалов, более адекватным является не односторонний учет влияния тепломассообмена на реологические процессы, а описание их взаимного влияния друг на друга. Такой подход позволяет изучить влияние температурно-влажностного режима музейных помещений на процессы нагрузки и деформации полимерно-дисперсных материалов музейных экспозиций. Введение в систему дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепломассообмена и деформации в коллоидных капиллярно-пористых телах с учётом относительной влажности среды, в которой находится материал, позволяют максимально точно описать процессы, происходящие при музейном хранении экспонатов. Полученные в работе результаты могут быть использованы для разработки инженерных методов расчёта систем формирования микроклимата музейных помещений, как на стадиях проектирования соответствующих технических систем, так и в режимах реальной эксплуатации последних.

Ключевые слова: тепломассообмен, деформация, дисперсность, материалы.

UDC 539.3(075)

Theoretical Development of Thermal-Exchange and Deformation Processes in Polymerical Dispersion Solids for Microclimate Forming in Museums

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovnyuk²

¹ PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, tgsiv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-4836-5354

² PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ychovnyuk@ukr.net

Abstract. For storage of museum exhibits, among which polymeric disperse, it is necessary to provide microclimate parameters that slow down aging and degradation as much as possible. An adequate physico-mechanical model is justified that consists of a system of differential equations for the joint description of heat-exchange and deformation processes in disperse materials. It is obtained using the Boltzmann-Volterra theory, the first law of thermodynamics for open systems, and the method for determining the parameters of the influence functions. It is shown that when studying the influence of heat and moisture on the deformation properties of polymeric materials, it is more consistent to take into account description of their mutual influence on each other rather than separately the influence of heat and mass transfer on rheological processes. This approach allows studying the influence of temperature-humidity regime of museum premises on the processes of load and deformation of polymer-dispersed materials of museum exposition. Including the differential equations that describe the processes of heat transfer and deformation in colloidal capillary-porous bodies taking into account the relative humidity of the environment in which the material is located, allows accurate description the processes that occur during the museum storage of exhibits. The results obtained in the work can be used to develop engineering methods for calculating the systems of forming the microclimate of museum premises, both at the stages of designing the relevant technical systems, and in the regimes of actual operation.

Keywords: influence, deformation, dispersion, materials.

Надійшла до редакції / Received 20.11.2017

УДК 624.04:697.11

Нормування ультрафіолетового опромінення приміщень і територій за енергетичними критеріями

О. В. Сергейчук¹, В. О. Єгорченков², Д. О. Радомцев³¹д.т.н., проф., Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, ovsergeich@i.ua, ORCID:000-0003-0226-3923²к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, egval@ukr.net, ORCID:000-0003-2910-0331³провідний архітектор, ТОВ «Архімагіка», м. Київ, Україна, d.radomtsev@gmail.com, ORCID:0000-0002-5358-9897

Анотація. Уцілення забудови супроводжується появою певних негативних факторів середовища проживання, зокрема його світло-інсоляційного режиму. У сучасних українських нормах критерієм оцінки ультрафіолетового опромінення є тривалість інсоляції. Але це нормування недосконале, оскільки сонячна радіація змінюється як за інтенсивністю і спектральним складом, так і в об'ємі приміщень. Крім того, інсоляція не враховує опромінення розсіяною і відбитою від оточення радіацією. Особливо це стосується ультрафіолетової частини спектру – її інтенсивність становить 70...80 % від прямої. Для більш повного врахування ресурсів сонячної радіації для життєзабезпечення необхідний перехід до оцінки ультрафіолетового опромінення від часових критеріїв до енергетичних. Тому метою даної роботи є розробка науково-методичних принципів переходу до такої оцінки. У статті наведені залежності, за якими можна визначити дози прямої, розсіяної та відбитої ультрафіолетової сонячної радіації. Особлива увага приділена визначенню розсіяної та відбитої складовим, оскільки саме ці види радіації опромінюють найбільшу частину внутрішнього простору приміщення. Їх пропонується визначати на підставі нового математичного апарату точкового числення. Представлена методика визначення опромінення. Пропонуються методи нормування ультрафіолетового опромінення за енергетичними параметрами.

Ключові слова: інсоляція, ультрафіолетове опромінення, спектр радіації, енергетичні критерії

Постановка проблеми і її актуальність.

Уцілення забудови в містах і населених пунктах супроводжується підвищенням поверховості будівель. У зв'язку з цим мають місце негативні фактори середовища проживання, зокрема його світло-інсоляційного режиму. Особливо це стосується нижніх поверхів будівель. Тому дослідження в галузі формування світло-інсоляційного комфорту в будівлях набуває особливу актуальність.

Останні дослідження та публікації. У сучасних українських нормах ультрафіолетове опромінення визначається тривалістю інсоляції [1]. Безумовно, час опромінення простору й організмів прямою сонячною радіацією дуже важливий, але недостатній. Адже сонячна радіація змінюється як за інтенсивністю, спектральним складом, так і в об'ємі приміщень. Також важливе значення має і тип радіації: пряма, розсіяна, відбита та сумарна.

Деякі автори пропонують нормувати інсоляцію за середньорічним значенням встановленого оптимуму для визначеної широти даної місцевості [2].

У щільній забудові забезпечення нормативних вимоги з інсоляції є складною задачею. Хоча пряма радіація є найбільш інтенсивною, але не можна нехтувати розсіяною і відбитою складовими. Особливо це стосується ультрафіолетової

частини сонячного спектра, оскільки частка розсіяної складової в ультрафіолетовій радіації (УФР) становить 70-80 % від прямої (для порівняння, в інтегральному потоці сумарної радіації частка розсіяної радіації [3] становить лише 10...20 %, що видно з рис.1). Тим паче, сонячна радіація в природних умовах ніколи не буває тільки прямою.

Для удосконалення обчислення ресурсу сонячної радіації для життєзабезпечення людини необхідний перехід від оцінки тривалості інсоляції до доз УФР. На це вказували науковці ще наприкінці минулого століття [4, 5].

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є розробка науково-методичних принципів переходу до оцінювання УФР за енергетичними критеріями.

Основна частина. Енергетична сумарна освітленість (опроміненість) у розрахунковій точці (РТ) горизонтальної площини приміщення в ультрафіолетовому діапазоні частот спектра $E^{уф}$, визначається за формулою:

$$E^{уф} = E_{пр}^{уф} + E_{роз}^{уф} + E_{відб}^{уф}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

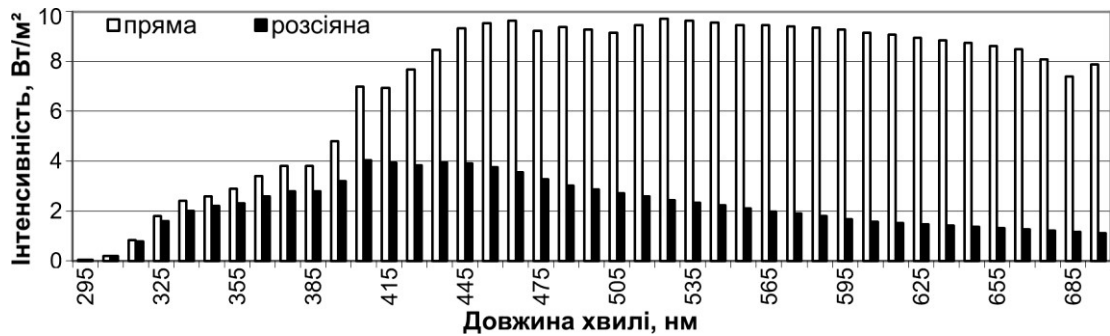


Рис.1. Спектр прямої і розсіяної сонячної радіації на ефективній бактерицидній ділянці на рівні моря при висоті сонця 60° над горизонтом при яснуому небі

де $E_{пр}^{уф}$ – пряма освітленість, яка проникає до приміщення крізь прорізи безпосередньо від сонячного диска, Вт/м²; $E_{роз}^{уф}$ – розсіяна освітленість, яка проникає до приміщення від небосхилу, Вт/м²; $E_{відб}^{уф}$ – відбита освітленість від землі, сусідніх будівель і внутрішніх поверхонь приміщення, Вт/м².

Перша складова визначається з наступного виразу:

$$E_{пр}^{уф} = \frac{E_{со}^{уф} \tau_o^{уф}}{\Delta^2} p^M \sin h_o, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

де $E_{со}^{уф}$ – енергетична освітленість площини, Вт/м², нормальної до напрямку УФР на зовнішньої межі атмосфери, яка може бути визначена за стандартом [6] ASTM E490-00a(2014) (рис.2);

Δ – астрономічна одиниця, яка характеризує середню відстань від Сонця до Землі (в інженерних розрахунках приймається рівною одиниці); p – прозорість атмосфери (для крупних міст і мегаполісів може бути прийнятою рівною 0,6); M – повітряна маса атмосфери (може бути прийнятою за таблицею Бемпорада [5] залежно від кутової висоти сонцестояння); h_o – кутова висота стояння Сонця над горизонтом, град.; $\tau_o^{уф}$ – коефіцієнт пропускання УФР крізь віконне заповнення (рис. 3).

Відомо, що ультрафіолетова область спектра на зовнішньої межі атмосфери становить близько 4 % від інтегрального потоку [7]. Тому при розрахунках можна користуватися або даними графіка (рис. 2) або значенням

$$E_{со}^{уф} = 0,04 \cdot E_{со}, \quad (3)$$

де $E_{со} = 1366,1 \text{ Вт/м}^2$ – тепла сонячна стала.

За формулою (3) $E^{уф} = 54,64 \text{ Вт/м}^2$, що узгоджується с даними графіка на рис. 2.

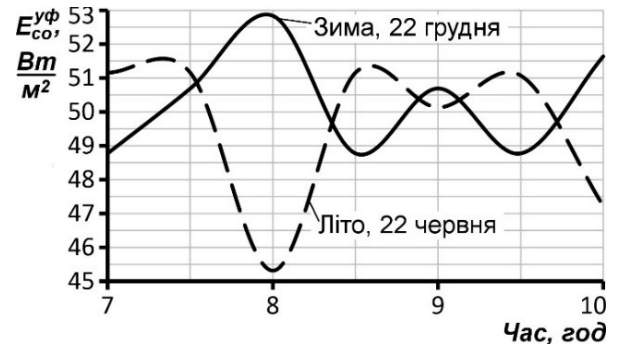


Рис.2. Значення УФР в діапазоні довжин хвиль 280...380 нм на зовнішній межі атмосфери

Розсіяна освітленість від небосхилу $E_{роз}^{уф}$, Вт/м², визначається за методикою [8, 9] з використанням нового математичного апарату точкового числення:

$$E_{рас}^{уф} = L_z \tau_o^{уф} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij}^D \sigma_{ij}^D, \quad (4)$$

де L_z – енергетична яскравість, Вт/м², у зеніті небосхилу ультрафіолетової області спектра (може бути прийнята для різних міст за матеріалами європейського проекту Satelight за 1996 рік) [10]; g_{ij}^D – коефіцієнт відносної яскравості елементарної ділянки неба в напрямку його центра із РТ; σ_{ij}^D – значення проєкції тілесного кута елементарної ділянки на нормаль до площини, в якій знаходиться РТ. Визначається за відомою формулою Вінера [11]; m, n – кількість точок сканування поверхні небосхилу, видимої з даної РТ крізь проріз у двох напрямках.

Відбита складова визначається з урахуванням коефіцієнтів відбиття ультрафіолетового випромінювання. Наприклад, коефіцієнти відбиття випромінювання с довжиною хвилі 300 нм алюмінієвої фарби становить 0,65; білого вапна – 0,48; світлого сухого піску – 0,17 тощо [12].

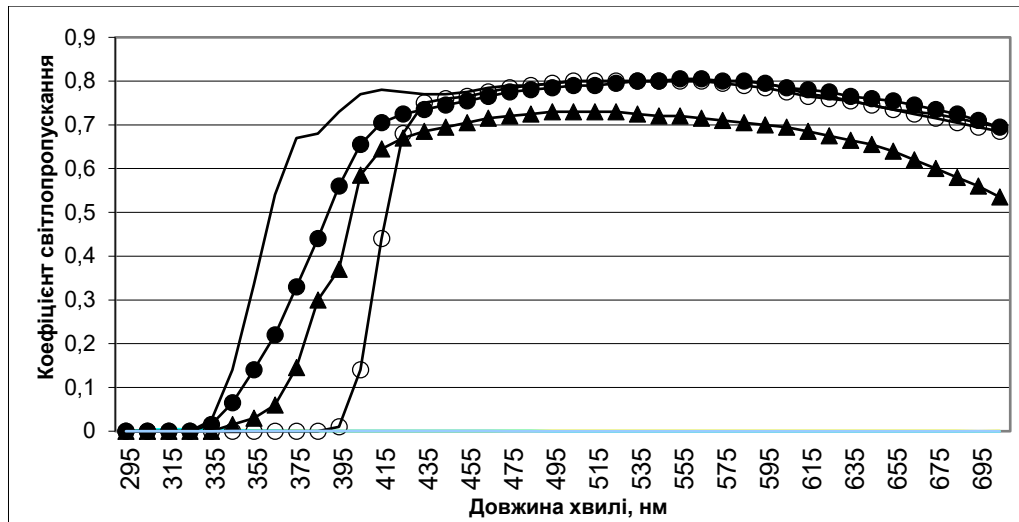


Рис. 3. Спектральне світлопропущення різних типів склопакетів (згідно бази даних Glad 2004/3):

- — склопакет (А) із флуат-скла, прозорість для видимого світла $\tau_{vis} = 78\%$, ультрафіолетової радіації $\tau_{uv} = 36\%$, загальної енергії $\tau_{sol} = 54\%$;
- теплозахисний склопакет (Б) з «м'яким» покриттям (срібло) на третій поверхні $\tau_{vis} = 79\%$, $\tau_{uv} = 20\%$, $\tau_{sol} = 54\%$;
- ▲— сонцезахисний склопакет (В) з комбінованим «твердим» (срібло + оксиди) покриттям на 2-й поверхні, $\tau_{vis} = 71\%$, $\tau_{uv} = 9\%$, $\tau_{sol} = 39\%$;
- шумозахисний склопакет (Г) – зовнішній шар – триплекс з полівінілбутиловою плівкою 4-1-4, $\tau_{vis} = 79\%$, $\tau_{uv} = 0$, $\tau_{sol} = 60\%$. g_{ij}^D – коефіцієнт відносної яскравості елементарної ділянки неба в напрямку його центра із РТ;

Методика-алгоритм розрахунку відбитої складової ґрунтується на наступних положеннях.

- формується поле точок сканування методом точкового числення на всіх внутрішніх поверхнях приміщення, а також на всіх зовнішніх об'єктах, які впливають на енергетичну освітленість РТ (поверхнях поруч розташованих будівель і прилеглих ділянок земної поверхні) і визначаються координати цих точок за допомогою точкових рівнянь;
- визначається освітленість від сонця, неба і зовнішніх об'єктів крізь усі світлові прорізи в РТ приміщення;
- визначаються координати центрів площинок внутрішніх поверхонь, які беруть участь у процесі відбиття;
- у центрах цих площинок визначається освітленість від сонця, неба і зовнішніх об'єктів крізь усі світлові прорізи;
- визначається енергетична яскравість кожної площинки відповідно до припущення, що поверхня відбиває за всіма напрямками однаково (ламбертова поверхня),
- визначається енергетична освітленість від первісного відбиття в РТ від всіх площинок;

- підраховується частка освітленості за рахунок первісного відбиття в РТ в загальній величині освітленості;
- далі підраховується вторинне відбиття і також підсумовується з освітленістю від світлових прорізів, первинним відбиттям тощо
- при кожному відбитті обчислюється відносний приріст освітленості;
- коли величина відносного приросту буде достатньо мала, розрахунок припиняється.

На практиці, поки не розроблена програма розрахунку, можна розраховувати опромінення розсіяною і відбитою сонячною радіацією з використанням графіків А.М. Данилюка для визначення величини проекції тілесних кутів на розрахункову площину [13].

Нормативні значення ультрафіолетового опромінення за енергетичним критерієм можна, в першому наближенні, отримати з використанням чинних норм тривалості інсоляції з таких міркувань.

Оскільки тривалість інсоляції нормується з 22 березня по 22 вересня для умов ясного неба (початок розрахункового часу інсоляції – 1 година після сходу сонця, кінець – 1 година до його заходу), то мінімально допустима доза УФР, $H_{\text{н}}^{\text{уф}}$, Дж/м², на горизонтальній поверхні (підві-

конник вікна або майданчик території) визначається формулою

$$H_n^{yf} = E_{пр\ cер}^{yf} \cdot t_n, \quad (5)$$

де $E_{пр\ cер}^{yf}$ – середня освітленість прямою сонячною радіацією розрахункової точки за період часу t_n до кінця розрахункового часу інсоляції 22 липня (час з найменшою прозорістю атмосфери);

t_n – чинний санітарно-гігієнічний мінімум інсоляції в секундах.

При розрахунку $E_{пр\ cер}^{yf}$ у формулі (2) приймається значення τ_o^{yf} для застосування згідно з проектними даними, а при розрахунку на території $\tau_o^{yf}=1$.

Оскільки всі викладки йдуть в одному діапазоні частот, то отримане значення можна прирівняти до сумарної нормативної дози УФР.

Висновки. Запропонований підхід до зміни критерію нормування ультрафіолетового опромінення приміщень і територій дозволить значно уточнити врахування містобудівної ситуації, а саме, необхідних за санітарно-гігієнічними вимогами розривів між будівлями, затінення дитячих і спортивних майданчиків.

Перспективи подальших досліджень Планується на підставі цього підходу розробити програму розрахунку не тільки містобудівної ситуації, а і проектування раціональних систем природного освітлення з точки зору як інсоляції, так і природного освітлення. На даному етапі за відсутності програми для проєктантів можна розробити відповідний графічний інструментарій – мапи УФР ясного і похмурого неба для архітектурно-кліматичних будівельних районів України, а також, можливо, мапи відбитої УФР від земної поверхні. Розрахунок за такими мапами аналогічний розрахунку за енергетичними мапами [14].

Література

1. ДБН 360-92** Містобудування. Планування та забудова міських і сільських поселень. Зі змінами. – Чинні від 19.04.2002. – Київ: Укрархбудінформ, 2002. – 125 с.
2. Бахарев Д. В. О нормировании и расчете инсоляции / Д. В. Бахарев, Л. Н. Орлова. // Светотехника. 2006. – № 1. – с. 18-27
3. Леру Р. Экология человека. Наука о жилищном строительстве / Р. Леру. – Москва: Стройиздат, 1970. – 264 с.
4. Оболенский Н. В. Архитектура и солнце / Н. В. Оболенский. – Москва: Стройиздат, 1988. – 207 с.
5. Архитектурная физика: Учеб. для вузов: Спец. «Архитектура». / В. К. Лицкевич, Л. И. Макриненко, И. В. Мигалина и др.; Под ред. Н. В. Оболенского. – Москва: Архитектура-С, 2016. – 448 с.
6. ASTM E490-00a(2014). Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. – American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. – 16p. – (ASTM стандарт). Режим доступу: <http://www.astm.org/Standards/E490.htm> (дата звернення: 04.02.2015).
7. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
8. Egorchenkov V. Principles of Constructing Light Field Model for a Room with Curvilinear Quadrangular Light Openings by Means of the Dot Calculation / V. Egorchenkov, E. Konopatsky // Light & Engineering (Svetotekhnika). – 2015. – Vol. 23, No. 2. – p. 43-48.
9. Егорченков В. А. Прямая естественная освещенность от четырехугольного светопроема в плоскости общего положения / В. А. Егорченков // Прикладна геометрія та інженерна графіка: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2012. – Вип. 90. – с. 102-106.
10. Satelight. The European database of daylight and solar radiation. Access: <http://www.satelight.com/core.htm> (дата звернення: 04.02.2015).
11. Wiener Ch. Lehrbuch der darstellenden Geometrie / Ch. Wiener. – Leipzig, 1884.
12. Реконструкція житла / Матеріали Четвертої Міжнародної виставки-конференції «Реконструкція житла» // RG / Київ, 2002. – Київ, 4 – 7 червня 2002 р.
13. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Зміна № 2. – Чинні від 1.09.2012. – Київ: Укрархбудінформ, 2012. – 36 с.
14. Сергейчук О. В. Особенности методики расчёта солнечных поступлений в национальном приложении к ДСТУ Б EN ISO 13790 / О. В. Сергейчук, В. С. Буравченко, Д. А. Радомцев и др. // Энергоэффективность в строительстве и архитектуре: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 6. – с. 267-272.

References

1. *Mistobuduvannia. Planuvannia ta zabudova miskih i silskih poselen.* DBN 360-92**, Ukrarhbudinform, 2002.
2. Baharev D. V., Orlova L. N. "O normirovanii i raschete insoliatsii", *Svetotekhnika*, no.1, 2006, pp. 18-27.
3. Leru R. *Ekologiya cheloveka. Nauka o zhilishchnom stroitelstve.* Stroyizdat, 1970.
4. Obolenskiy N. V. *Arhitektura i solntse.* Stroyizdat, 1988.
5. *Arhitekturnaia fizika: Ucheb. dlia vuzov: Spets. «Arhitektura».* / V. K. Litskevich, L. I. Makrinenko, I. V. Migalina i dr.; Edited by Obolenskii N. V., Stroyizdat, 1997.
6. *ASTM E490-00a. Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables* (ASTM standard). <http://www.astm.org/Standards/E490.htm>. Access: 04.02.2015.
7. Marveiev L. T. *Kurs obshchei meteorologii. Fizika atmosfery.* Gidrometeoizdat, 1984.
8. Egorchenkov V., Konopatsky E. "Principles of Constructing Light Field Model for a Room with Curvilinear Quadrangular Light Openings by Means of the Dot Calculation." *Light & Engineering (Svetotekhnika)*, vol. 23, no. 2, 2015, pp. 43-48.
9. Egorchenkov V. A. "Priamaia yestestvennaia osveshchennost ot chetirehugolnogo svetoproyma v ploskosti obshchego polozheniia." *Prikladna geometriia geometriia ta ingenerna grafika: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 90, Kyiv National University of Construction and Architecture 2012, pp. 102-106.
10. *Satellight. The European database of daylight and solar radiation*, <http://www.satellight.com/core.htm>. Access: 04.02.2015.
11. Wiener Ch. *Lehrbuch der darstellenden Geometrie*, Leipzig, 1884.
12. Реконструкція житла, Матеріалі Четвертої Міжнародної виставки-конференції «Реконструкція житла», RG, Kyiv, 2002.
13. *Prirodne i shtuchne osvitenia. Zmina № 2.* DBN B.2.5-28-2006, Ukrarhbudinform, 2012.
14. Sergeichuk O. V., Buravchenko V. S., Radomtsev D. A. i dr. "Osobnosti metodiki rascheta solnechnih postuplenii v natsionalnom prilozhenii k DSTU EN ISO 13790" *Energoefektivnost v budivnitstvi ta arhitekturi*, iss. 6, 2014, c. 267-272.

УДК 624.04:697.11

Нормирование ультрафиолетового облучения помещений и территорий по энергетическим критериям

О. В. Сергейчук¹, В. А. Егорченков², Д. О. Радомцев³

¹д.т.н., проф., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, ovsergeich@mail.ru,
ORCID:000-0003-0226-3923

²к.т.н., доц., Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, egval@ukr.net,
ORCID:000-0003-2910-0331

³ведущий архитектор, ООО «Архиматика», г. Киев, Украина, d.radomtsev@gmail.com, ORCID:0000-0002-5358-9897

Аннотация. Уплотнение застройки сопровождается появлением определённых негативных факторов среды обитания, в том числе и его свето-инсоляционного режима. В современных украинских нормах критерием оценки ультрафиолетового облучения является время инсоляции. Но это нормирование несовершенно, потому что солнечная радиация изменяется как по интенсивности и спектральному составу, так и по объёму помещений. Кроме того, инсоляция не учитывает облучение рассеянной и отражённой от окружающих поверхностей радиацией. Особенно это касается ультрафиолетовой части спектра – её интенсивность составляет 70...80 % от прямой. Для более полного учёта ресурсов солнечной радиации для жизнеобеспечения необходим переход к оценке ультрафиолетового облучения от временных критериев к энергетическим. Поэтому целью данной работы является разработка научно-методических принципов перехода к такой оценке. В статье представлены зависимости, по которым можно определить дозы прямой, рассеянной и отражённой ультрафиолетовой солнечной радиации по энергетическим параметрам. Особое внимание здесь уделяется определению рассеянной и отражённой составляющих, поскольку именно эти виды радиации наиболее полно облучают внутреннее пространство помещения. Эти виды радиации предлагается определять на основе нового математического аппарата точечного исчисления. Представлена методика определения облучения. Предлагаются методы нормирования ультрафиолетового облучения по энергетическим параметрам.

Ключевые слова: инсоляция, ультрафиолетовое облучение, спектр радиации, энергетические критерии

UDC 624.04:697.11

Standardization of Ultraviolet Irradiation of Rooms and Territories by Energy Criteria

O. Sergeychuk¹, V. Egorchenkov², D. Radomtsev³

¹DSc, prof., Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, ovsergeich@mail.ru, ORCID:000-0003-0226-3923

²PhD, as.prof., Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, egval@ukr.net, ORCID:000-0003-2910-0331

³lead architect, «Archimatika», Kyiv, Ukraine, d.radomtsev@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5358-9897

Abstract. Compaction of building attended by appearance of negative factors in quality of habitat environment especially of light-insolation condition. In modern Ukrainian standards, criterion of ultraviolet radiation estimation is insolation duration. However, this normalization is imperfect because the solar radiation vary by intensity, spectral distribution, and volume of premises. In addition, insolation does not take into account diffuse and reflected irradiation from surrounding surfaces. Particularly it is important for ultraviolet spectrum region – its density is 70...80% of direct irradiation. For complete accounting of solar irradiation for life sustenance, replacement of time criteria by energy estimation of ultraviolet irradiation is required. That is why aim of this paper is development of methodological principles of this estimation. The paper represents dependences for definition of direct, diffuse and reflected ultraviolet solar irradiation doses. Special attention spare to estimation of diffuse and reflected components because these types of emission irradiate largest part of internal space of premises. It is proposed to determine those types of radiation by new mathematical apparatus of point calculation. An estimation method of the irradiation is offered. Algorithms of standardization of ultraviolet irradiation by energy parameters is proposed.

Key words: insolation, ultraviolet radiation, radiation spectrum, energy criteria

Надійшла до редакції / Received 18.11.2017

УДК 697.34.005.8:711.4

Аналіз та оцінка заходів щодо підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання

К. М. Предун¹, Ю. Й. Франчук²

¹к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 31172@ukr.net

²здобувач. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2304elena@ukr.net

Анотація. Системи централізованого теплопостачання населених пунктів України сьогодні є прикладом неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів у державі. Заміна основного палива - природного газу – для потреб джерел теплоти альтернативним дає економію коштів місцевих бюджетів в умовах децентралізації державного управління (за рахунок різниці цін природного газу та інших органічних палив). Водночас лише такі заходи породжують ряд інших проблем. Збільшення забруднення навколишнього природного середовища – одна із них. Досліджено шляхи підвищення енергоефективності та енергозбереження в житлово-комунальному господарстві з метою зменшення викидів парникових газів в атмосферу. На основі виконаних розрахунків визначена пріоритетність заходів. Їхня реалізація дозволяє залишити як основне органічне паливо для потреб централізованого теплопостачання найбільш екологічне – природний газ.

Ключові слова: система теплопостачання, енергоефективність, житловий будинок, термомодернізація, природний газ, альтернативні палива, викиди забруднюючих речовин, парникові гази

Вступ. Енергетична безпека на сьогодні є одним із головних пріоритетів України. В економіці держави домінують викопні види палива (сукупно вугілля і природний газ складають до 60 % вітчизняного енергетичного балансу), морально застарілі технології, технічно зношене обладнання та устаткування видобувних, енергогенеруючих і постачальних підприємств [1, 2].

Актуальність дослідження. Житлово-комунальний сектор – потужний споживач паливно-енергетичних ресурсів. Соціальна спрямованість державної політики України, популізм у недалекому минулому щодо тарифної політики спричинили надлишкові витрати для генерації енергії, понаднормові втрати при її транспортуванні та розподілі, неефективне використання при експлуатації інженерних систем будівель і споруд.

Збільшення вартості енергоресурсів спонукає як окремих мешканців житлових будинків, так і державу загалом впроваджувати заходи як з енергозбереження, так і з підвищення енергоефективності будівель і споруд.

Останні дослідження та публікації. В Україні розроблена законодавча база та прийняті нормативно-правові документи, гармонізовані з європейськими директивами і стандартами, щодо зменшення первинного енергоспоживання. Це сприяє поширенню інноваційних технологій, а також зменшенню викидів парникових газів в атмосферне повітря. Наприклад, у Законі України «Про енергоефективність будівель»

[3] встановлено пріоритетність заходів щодо забезпечення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей протягом нормативного строку експлуатації будівлі при нормативно допустимому рівні витрат енергії [4].

Аналіз рішень щодо практичного реалізації вказаних заходів, особливо в умовах децентралізації державного управління, засвідчує майже цілковите недотримання вказаної послідовності. Серед основних (які на перший погляд дають економію коштів) для потреб теплопостачання населених пунктів слід відзначити:

1) заміну традиційного палива – природного газу – альтернативним, як правило, місцевим – торфом, вугіллям, брикетами шихти / деревини тощо;

2) використання електроенергії, переважна більшість якої генерується атомними електростанціями.

Слід зазначити, що до 2020 р. в Україні вичерпають проектний строк експлуатації (30 років) 12 з 15 енергоблоків. Але з усіх держав, які розвивають атомну енергетику, лише в США кількість енергоблоків, роботу яких продовжено, перевищує кількість зупинених [5]).

Фізико-хімічні властивості деяких палив наведено нижче:

1) природний газ:

а) нижча теплота спалювання

$$Q_p^u = 34 \text{ МДж/м}^3;$$

б) густина $\rho = 0,73 \text{ кг/м}^3$;

2) торф:

а) нижча теплота спалювання

$$Q_p^H = 10,8 \text{ МДж/кг};$$

б) зольність палива в робочому стані

$$A^r = 12,5 \%;$$

в) вміст сірки в паливі в робочому стані

$$S^r = 0,3 \%;$$

г) вологість палива в робочому стані

$$W^r = 50 \%.$$

Формулювання цілей статті. Дана робота присвячена дослідженню ефективності реалізації першочергових заходів щодо термомодернізації багатоквартирних житлових будинків і в кінцевому випадку – зменшенню викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря.

Основна частина. Проаналізовано заходи щодо підвищення енергоефективності мікрорайону існуючої багатоповерхової житлової забудови населеного пункту, який знаходиться в першій температурній зоні України. Усі будинки однакові: чотирисекційні, п'ятиповерхові, на 80 квартир кожний. Вони побудовані за типовими проектами у 70-і роки минулого століття. Джерелом теплоти є опалювальна котельня з якісним регулюванням теплових потоків. Паливом є природний газ. Індивідуальні теплові пункти за залежною схемою приєднані до міських теплових мереж зі сталевих трубопроводів, прокладених у непрохідних каналах. Система теплопостачання була розрахована на дотримання температурного графіка $T_1/T_2 = 150/70 \text{ }^\circ\text{C}$.

У зв'язку з частковим недотриманням розрахункової температури повітря ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) у приміщеннях будинку протягом опалювального періоду (внаслідок недотримання температурного графіку в тепловій мережі при якісному регулюванні тепловіддачі) фактичне питоме споживання теплоти для потреб опалення 1 м^2 загальної площі не перевищує 100 Вт/м^2 . Відповідно, теплова потужність системи опалення становить $Q_0 = 500 \text{ кВт}$.

Враховуємо всі можливі втрати теплоти на шляху транспортування теплоносія «джерело теплоти – окремий опалювальний прилад». Тоді витрата первинного палива (природного газу з робочою нижчою теплотою спалювання $Q_p^H = 34 \text{ МДж/м}^3$) протягом опалювального періоду становить $221,1 \text{ тис. м}^3$, що в реальних цінах відповідає $1,77 \text{ млн. грн}$.

При заміні природного газу місцевим паливом, наприклад, торфом, джерело теплоти додатково слід обладнати:

1) котлоагрегатами, призначеними для його спалювання;

2) пилогазоочисним устаткуванням для зменшення викидів забруднюючих речовин (у першу чергу золи) в атмосферне повітря.

Окрім того, площа земельної ділянки для розміщення джерела теплоти з використанням природного газу є найменшою порівняно з будь-якими іншими видами палива [6]. Отже, в умовах щільної міської забудови може виникати проблема розміщення на території існуючої котельні паливних складів і золовідвалів. У свою чергу це викликає збільшення розмірів санітарно-захисної зони, що може призвести до її «накладання» на зону прилеглої житлової забудови.

У табл. 1 подано результати розрахунку витрат основного і альтернативного палива без зміни теплової потужності котельні (на прикладі опалення одного будинку). Викиди забруднюючих речовин до атмосферного повітря визначені розрахунковим шляхом відповідно до методики [7].

Аналіз даних, наведених у табл. 2, показує, що при відмові від використання природного газу для потреб теплопостачання і його заміні місцевим паливом можна досягти економії коштів приблизно 2000 грн на 1 кВт необхідної потужності системи опалення за опалювальний період. Проте, водночас майже у 2 рази збільшуються викиди забруднюючих речовин, серед яких і парникові гази, до атмосферного повітря.

Завдяки додатковому утепленню зовнішніх огорожень житлового будинку відповідно до вимог [4] можна досягти зменшення теплової потужності системи опалення майже у 2,5 р. і, відповідно, зменшення витрати первинного палива.

При зменшенні теплових навантажень зменшуються в кінцевому підсумку і витрати електроенергії для транспортування теплоносія. Для умов розглянутої задачі питомі втрати тиску на тертя зменшуються від 250 до 110 Па/м (при незмінному діаметрі трубопроводу теплової мережі). У загальному випадку можливе суттєве зниження як матеріаломісткості систем централізованого теплопостачання (при зменшенні діаметрів трубопроводів на $1...2$ калібри за рахунок зменшення витрати теплоносія), так і втрати теплоти при транспортуванні від джерела до споживача.

Вартість природного газу для потреб опалення окремого житлового будинку після термомодернізації його зовнішньої оболонки стає сумірною з вартістю альтернативного палива, а викиди забруднюючих речовин в атмосферу зменшуються приблизно в п'ять разів. (відповідно, $0,988$ і $5,044 \text{ т}$ за опалювальний період).

Таблиця 1

Характеристика джерела теплоти при зміні виду палива

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Вид палива	
			газ	торф
1	Теплова потужність системи опалення будинку	кВт	500	500
2	Витрата первинного палива:			
2.1	максимально-годинна	м ³ /год	103,0	–
		кг/год	–	333,3
2.2	протягом опалювального періоду	млн. м ³	0,221	–
		т	–	714,0
3	Вартість палива (за опалювальний період)	млн. грн	1,77	0,71
4	Викиди забруднювачів (за опалювальний період), серед яких:	т	2,471	5,044
4.1	Оксид вуглецю	т	1,870	3,740
4.2	Оксиди азоту (в перерахунку на NO ₂)	т	0,601	1,234
4.3	Летюча зола	т	–	0,034
4.4	Оксиди сірки (в перерахунку на SO ₂)	т	–	0,036

Таблиця 2

Характеристика джерела теплоти до та після термомодернізації зовнішньої оболонки будинку

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	Вид палива	
			газ	газ
			Термомодернізація	
			не виконана	виконана
1.	Теплова потужність системи опалення будинку	кВт	500	200
2.	Витрата теплоносія	т/год	5,375	3,44
3.	Діаметр трубопроводу	мм	57x3	57x3
4.	Питома втрата тиску на тертя	Па/м	250	110
5.	Швидкість руху теплоносія	м/с	0,8	0,5
6.	Витрата первинного палива:			
6.1	Максимально-годинна	м ³ /год	103,0	41,0
6.2	Протягом опалювального періоду	млн. м ³	0,221	0,088
7.	Вартість палива (за опалювальний період)	млн. грн	1,77	0,71
8.	Викиди забруднювачів (за опалювальний період), серед яких:	т	2,471	0,988
8.1	Оксид вуглецю	т	1,870	0,748
8.2	Оксиди азоту (в перерахунку на NO ₂)	т	0,601	0,240
8.3	Летюча зола	т	–	–
8.4	Оксиди сірки (в перерахунку на SO ₂)	т	–	–

Висновки. Першочергові заходи щодо встановлення в котельних водогрійних котлів для використання місцевих альтернативних видів палива, наприклад, торфу, дають лише економію коштів (за рахунок різниці цін природного газу і альтернативного палива). Це не сприяє підвищенню енергоефективності та енергозбереженню в житлово-комунальному господарстві. Водночас, не вирішується інша головна проблема – зниження викидів забруднювачів, зок-

рема парникових газів, до атмосферного повітря. Виконані розрахунки показують, що для підвищення енергоефективності існуючих житлових будинків та систем централізованого теплопостачання населених пунктів може бути рекомендована така пріоритетність заходів: термомодернізація зовнішньої оболонки будинків (витрати теплоти для потреб опалення зменшуються не менше, чим у 2.5 р.); заміна трубопроводів теплових мереж (знижуються матеріалоемність систем (до 10 %) і втрати теплоти при її

транспортуванні (в середньому на 20...25 %); реконструкція інженерних систем будинків з метою управління тепловими потоками та обліку фактично спожитої теплоти; заміна існуючих теплогенеруючих установок на котли з більш високими еколого-теплотехнічними характеристиками, що споживають як природний газ, так і палива органічного походження. Реалізація вказа-

них заходів зможе дозволити залишити як основне органічне паливо для потреб теплопостачання населених пунктів України найбільш екологічне – природний газ. Тим паче, розвідані запаси дозволяють збільшити його видобуток і повністю відмовитися від закупівель закордоном [2].

Литература

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. – Схвал. розпорядженням КМУ від 15 березня 2006 р. N 145-р. – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-p>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р. – Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085
3. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» – 2118-VII. – Київ: ВВР, 2017, №3, с.5, стаття 359.
4. ДБН В.2.6-31:2016 Теплова ізоляція будівель. – Чинні від 01.05.2017. – Київ: Укрархбудінформ, 2016. – IV, 31 с.
5. Хмара Д. О. Проблеми продовження терміну експлуатації ядерних реакторів на українських АЕС / Д. О. Хмара // Нова тема. – 2010. – №2. – с.20-23.
6. ДБН 360-92** Містобудування. Планування та забудова міських і сільських поселень. Зі змінами. – Чинні від 19.04.2002. – Київ: Укрархбудінформ, 2002. – 125 с.
7. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 142 с.

References

1. “Energetychna stratehgia Ukrainy na period do 2030 r.” <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-p>
2. “Energetychna stratehgia Ukrainy na period do 2035 r. «Bezpeka, energoefektyvnist, konkurentnospromozhnist.»” http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085
3. Zakon Ukrainy «Pro energetychnu efektyvnist budivel» - 2118 – VII
4. *Tepliva isoliatsiia budivel*. DBN V.2.6-31:2016, Ukrarhbudinform, 2016.
5. Khmara D.O. “Problemy prodovzhennia terminu ekspluatatsii jadernykh reaktoriv na ukrainykykh AES.” *Nova tema*, no. 2, 2010, pp. 20-23.
6. *Mistobuduvannia. Planuvannia ta zabudova miskih i silskih poselen*. DBN 360-92**, Ukrarhbudinform, 2002.
7. *Sbornik metodik po rasschetu vybrosov v atmosferu zagriazniauschikh veschestv razlichnymi proizvodstvami*. Gidrometeoizdat, 1986.

УДК 697.34.005.8:711.4

Анализ и оценка мероприятий по повышению энергоэффективности систем централизованного теплоснабжения

К. М. Предун¹, Ю. Й. Франчук²

¹к.т.н., доцент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, 31172@ukr.net

²соискатель. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, yuriy196405@mail.ru

Аннотация. Системы централизованного теплоснабжения населённых пунктов Украины сегодня являются примером неэффективного использования топливно-энергетических ресурсов в стране. Замена основного топлива – природного газа – для нужд источников теплоснабжения альтернативным даёт экономию средств местных бюджетов в условиях децентрализации государственного управления (за счёт разности цен природного газа и других органических топлив). В то же время такие мероприятия порождают ряд других проблем. Увеличение загрязнения окружающей природной среды – одна из них. Исследованы пути повышения энергоэффективности и энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве с целью уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу. На основании выполненных расчётов определена приоритетность мероприятий. Их реализация позволит оставить в качестве основного органического топлива для нужд централизованного теплоснабжения наиболее экологичное – природный газ.

Ключевые слова: система теплоснабжения, энергоэффективность, жилое здание, термомодернизация, природный газ, альтернативные топлива, выбросы загрязняющих веществ, парниковые газы

UDC 697.34.005.8:711.4

Analysis and Evaluation of Energy Efficiency Improvement Efforts of the Municipal Heating Systems

K. Predun¹, U. Franchuk²

¹Sc.D, professor. Kiev National University of Construction and Architects, Kyiv, Ukraine, 31172@ukr.net

²Applicant. Kiev National University of Construction and Architects, Kyiv, Ukraine, yuriy196405@mail.ru

Abstract. Nowadays, municipal heating systems of Ukrainian residential places are the example of inefficient exploitation of the governmental fuel and energy resources. Substitution of the core fuel material – natural gas – with alternative fuels leads to the economy of the local budgets under condition of the governmental control decentralization (due to the difference in price between natural gas and other organic fuels). At the same time, the mentioned above leads to other problems. Ways of energy efficiency improvement and energy conservation in the municipal facilities have been investigated, aimed to decrease emission of greenhouse gases in the atmosphere. Based on completed studies, the priority of the efforts has been identified. Their implementation allows retaining natural gas as the core organic fuel for municipal heating needs as the most ecologically friendly option.

Keywords: heat supply systems, energy efficiency, residential house, thermo-modernization, natural gas, alternative fuel, pollution emissions, greenhouse gases.

Надійшла до редакції / Received 12.12.2017

UDC:697.9:628.87:504.05

Marking Technology of Energy Efficiency for Heating Ventilation and Air Conditioning

M. Kordyukov¹

¹Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, melco@ukr.net

Abstract. For a number of reasons, the guidance documents on energy efficiency of HVAC systems, developed by the European institutions, are focused on heating systems. Development standards for energy efficiency of air-conditioning and ventilation systems is delegated to national regulators. In addition, there is an ability to define standards for energy efficiency in hot climate. Given global warming and European comfort indicators of residential and public premises, becomes relevant for Ukraine energy efficiency levels rationing HVAC technologies on the national level. The problem of marking the energy efficiency of ventilation and air conditioning technologies is relevant for Ukraine because the implementation of European standards for the comfort of residential and public premises requires the use of ventilation and air conditioning systems in most buildings.

Keywords: energy efficiency HVAC, the level energy efficiency HVAC, reduction of greenhouse gas emissions systems HVAC.

Introduction. Improving the energy performance of buildings (reducing energy consumption) is impossible without understanding what technologies allow more effectively reduce power consumption. Marking technology admit focus on the most effective solutions to reduce energy consumption in buildings for planners and energy managers.

Relevance of research. The requirement to reduce the energy consumption of buildings is antagonistic with respect to the indices of the comfort of buildings. For the health of people, why using buildings, the priority is to maintain normalized comfortable conditions in the premises. Therefore, it is an actual problem to determine the most effective technologies for maintaining comfortable parameters.

Purposes of the article. The European Commission has done considerable work [1-4] on marking heating technologies, resulting in the creation of the EU directive (Fig. 1)

	Best Available Technology (BAT) class for space heaters (including packages)
A+++	Packages using renewables
A++	Heat pumps (renewable) Best biomass boiler (renewable)
A+	Gas cogeneration
A	Condensing gas boilers
B	
C	Non-condensing gas boilers
D	Electric resistance

Fig. 1. Communication [1] from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. An EU Strategy on Heating and Cooling (SWD (2016) 24 final)

Main principles. It should be noted that this directive applies only to one segment of the HVAC

technology: forming of a comfortable microclimate by heating systems. For many countries, such as Ukraine, the other two systems – ventilation and air conditioning – consume energy not less than the relevant heating systems. It is proposed to mark also the degree of efficiency of ventilation and air-conditioning technology in addition to marking systems of heating.

The basis for labeling should lay leadership idea, used EU-degree greener technology, or minimize environmental damage, put the system in the process of maintaining comfort settings. Higher energy efficiency of HVAC systems corresponds to less damage of the environment, because increased energy efficiency of HVAC systems reduces emissions of greenhouse gases and other pollutants. Correct decision is also evaluating the effectiveness of technology rather than equipment: different HVAC equipment has individual characteristics, but the total energy is determined by positioning the perfection of technology, used in the equipment.

The following markings for air-conditioning technologies:

A+++ – packages installation for air-conditioning, heating and domestic hot water systems (DHW). Utilization of heat of air-conditioning for heating and DHW systems.

A++ – packages installation for simultaneous air conditioning and heating. Utilization of heat of air-conditioning for space heating.

A+ – direct exchange (DX) multi-zone installation of air-conditioning.

A – chillery installation multi-zoned air-conditioning.

B – DX local air-conditioning.

C – central air-conditioning.

D – removal of heat excess through ventilation.

The list displays both traditional and advanced air conditioning technologies designed for maintaining comfortable microclimate. In the list, position A+++ may be integrated solar technologies for heating DHW. Nevertheless, from an economic point of view this decision is too expensive.

For ventilation technology, the marking is offered as follows:

A+++ – enthalpy recovery ventilation (ERV). It means recovery of the heat and moisture from the exhaust air from the premises. It requires mechanical supply and exhaust ventilation. The recovery operates in winter and summer;

A++ – heat recovery ventilation (HRV). Heat recovery from exhaust air from the premises. It requires installation of supply and exhaust ventilation. The recovery operates mainly in winter.

A+ – forced ventilation with geothermal heat exchanger.

A – air-handling units with heating and cooling by heat pumps in winter and summer.

C – air-handling units that heat air by burning of fossil fuels in the winter mode;

D – natural ventilation.

The list reflects the technology really represented in manufactured equipment for ventilation of residential and public premises. Special attention deserves the ERV technology, which enables recovery of energy at heating and cooling operation.

Conclusions. All of the technologies proposed for ranking energy efficiency, are presented on the market and have been used in the construction. Technologies differ in size of capital investments and operating costs. Proposed classification allows quick assessing the attractiveness of their projects. The exact value of capital investments and operating costs is provided by a comparative calculation for a particular facility, which is usually performed during the feasibility study of the proposed solution.

References

1. An EU Strategy on Heating and Cooling {SWD(2016) 24 final}.
2. Directive 2009/28/EC European Parliament, Council of the European Union, COD 2008/0016.
3. Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products.
4. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for air conditioners and comfort fans.

УДК 697.9:628.87:504.05

Маркування технологій опалення, вентиляції та кондиціонування повітря за ступенем енергоефективності

М. Кордюков¹

¹Асистент. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, melco@ukr.net

Анотація. Через ряд причин, керівні документи щодо енергоефективності систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, розроблені європейськими інституціями, зосереджені на системах опалення. Розробка нормативів з енергоефективності систем вентиляції та кондиціонування повітря делегована національним регуляторам. Також їм надана можливість визначити нормативи енергоефективності в умовах жаркого клімату. З огляду на процеси глобального потепління та переходу на європейські показники комфортності житлових і громадських приміщень, для України стає актуальним нормувати рівні енергоефективних технологій вентиляції та кондиціонування повітря на національному рівні. В статті пропонується визначення рівнів енергоефективності систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Таке маркування технологій енергоефективності систем вентиляції та кондиціонування повітря дозволить проектувальникам швидко прийняти рішення щодо використання потрібного типу систем для заданого рівня енергоефективності будівлі.

Ключові слова: енергоефективність ОВК, рівень енергоефективності систем ОВК, зниження викидів парникових газів системами ОВК.

УДК 697.9:628.87:504.05

Маркировка технологий отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха по степени энергоэффективности

М. Кордюков¹

¹Ассистент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, melco@ukr.net

Аннотация. В силу ряда причин, руководящие документы по энергоэффективности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработанные европейскими институтами, сосредоточены на системах отопления. Разработка нормативов по энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха делегирована национальным регуляторам. Также им предоставлена возможность определять нормативы энергоэффективности в условиях жаркого климата. Учитывая процессы глобального потепления и перехода на европейские показатели комфортности жилых и общественных помещений, для Украины становится актуальным нормировать уровни энергоэффективности технологий вентиляции и кондиционирования воздуха на национальном уровне. Такая маркировка технологий энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха позволит проектировщикам быстро принять решение об использовании нужного типа систем для заданного уровня энергоэффективности здания.

Ключевые слова: энергоэффективность ОВК, уровень энергоэффективности систем ОВК, снижение выбросов парниковых газов системами ОВК.

Надійшла до редакції / Received 30.11.2017

УДК 697.942

Підвищення ефективності очищення коксового газу від пилу, вуглекислого газу та парів формальдегіду в скруберах насадкового типу.

О. Ф. Редько¹, Ю. І. Чайка², Ю. О. Бурда³

¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²к.т.н., доц. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, yuri.chayka@gmail.com, ORCID 0000-0001-7556-6306

³аспірант. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Анотація. У даній роботі наведені результати промислових випробувань нової трикутної насадки з хрестоподібними отворами при очищенні коксового газу від пилу, вуглекислого газу та парів формальдегіду. За цими даними побудовано порівняльні діаграми та графік регресії. У роботі розглянуті результати власних експериментів, які порівняно з результатами інших науковців, та різними статистичними даними. Для порівняння використано дерев'яну хордову насадку та найбільш ефективну за статистичними даними – кільця Рашига. Результати перевірки збігаються з теоретичними розрахунками та підтверджують ефективність нової насадки. Доведено ефективність нової насадки при очищенні коксового газу від CO₂ (вуглекислого газу), CH₂O (парів формальдегіду) та при очистці пилу. Нова насадка покращує очистку на 25 % по відношенню до дерев'яної хордової (її прототип) та на 15 % у порівнянні до кільця Рашига, які є однією з найефективніших насадок, та близькі за матеріалом до нової насадки. Також було доведено, що оптимальною температурою для усіх типів домішок є 15 °С.

Ключові слова: скрубер, коксовий газ, вуглекислий газ, пари формальдегіду, очистка від пилу, викиди в атмосферу, насадка, коксова промисловість.

Вступ. Атмосферне повітря — це природна суміш газів приземного шару атмосфери за межами житлових, виробничих та інших приміщень, що склалася в ході еволюції Землі. Хімічний склад атмосфери (для сухого повітря) містить:

- азоту — 75,6%,
- кисню — 23,1%,
- аргону — 1,29%,
- двоокису вуглецю — 0,045%,
- озону — 3,6x10⁻⁵%.

Газова оболонка Землі захищає все живе від ультрафіолетових променів. Проте, є фактори які погіршують стан атмосфери та потоншують цю оболонку. Зокрема, такими є антропогенні викиди [1-4].

Сумарно викиди до атмосфери становлять 380 тон отруйних речовин на 1 км³.

Атмосферне повітря забруднюється шляхом утворення в ньому забруднювальних речовин у концентраціях, що перевищують його природній вміст.

Забруднювальні речовини — це різні домішки які в певній концентрації чинять несприятливий вплив на навколишнє середовище. Зокрема, підвищена концентрація багатьох з них може викликати захворювання у людей та тварин [5-7].

Одним з постійних і розповсюджених компонентів забруднення є пил. Вміст у частинках

пилу домішок органічних і неорганічних сполук визначають його токсичну дію. Наприклад, пил, що містить у своєму складі білково-вітамінні речовини, може викликати розвиток алергічних захворювань у людей, які проживають неподалік від промисловості, яка його викидає.

Суттєвий вплив на склад атмосфери мають підприємства чорної і кольорової металургії, хімічна й нафтохімічна промисловість, енергетичні підприємства, целюлозно-паперова промисловість, автотранспорт і котельні.

Актуальність дослідження. Апарати мокрої газоочищення мають широке застосування в промисловості. Це зумовлено високим ступенем очищення від домішок діаметром 0,3...1,0 мкм, а також можливістю очищення від пилу гарячих і вибухонебезпечних газів, що є дуже важливим у чорній металургії.

Процес мокрого пиловловлення базується на контакті забрудненого пилом газового потоку з рідиною, яка захоплює зважені частинки та виводить їх з апарату у вигляді шламу [8, 9].

Процес очищення газу в апаратах мокрого газоочищення супроводжується, зазвичай, процесами абсорбції та охолодження газу.

Головними перевагами мокрого газоочищення є:

- порівняно невелика вартість та більш висока ефективність уловлювання зважених часток порівняно до сухого газоочищення;

- воно застосовується для очищення газів від часток розміром до 0,1 мкм;
- охолодження (контактний обмін) і зволоження (кондиціонування) газів;
- можливість застосування для очищення високотемпературних газових потоків, зокрема, це важлива особливість для коксової промисловості;
- менші габарити порівняно з тканинними фільтрами та можливість використання як абсорберів [10-12].

Однак, мокре газоочищення має і певні недоліки:

- виділення вловленого пилу у вигляді шламу, що пов'язано з необхідністю обробки стічних вод, тобто з дорожчанням процесу;
- можливість виносу краплин рідини і осадження їх з пилом в газоходах і димососах;
- у разі очищення агресивних газів необхідність захищати апаратуру та комунікації антикорозійними матеріалам [13].

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є перевірка ефективності трикутної насадки з хрестоподібними вирізами, порівняно з її аналогом – дерев'яною хордовою, – та найближчою за рівнем очищення – кільцями Рашига.

Основна частина. Завдяки новій конструкції та оптимальному діаметру вирізів, трикутна насадка з хрестоподібними вирізами забезпечує довший контакт насадки з водою, що дозволяє економити воду. Завдяки тому, що насадка виконана з AISI 316 (10X17N13M2) та вкрита цинком, вона може бути використана навіть у найбільш агресивному середовищі.

Спочатку коксовий газ охолоджувався за допомогою аміачної води від 750 до 80 °С. Потім він подавався до первинного газового холодильника безпосередньої дії, де його температура зменшувалася до 15 °С.

Для отримання даних були проведені промислові випробування. Порівнювалася ефективність очищення коксового газу при його охолодженні до 15 °С у скрубєрі насадкового типу для трьох видів насадок. Насадки встановлювалися без прив'язки до способу встановлення.

Для більш ретельного та ефективного дослідження було проведено по 6 дослідів для кожного типу домішки. У цих випробуваннях було перевірено ефективність очищення коксового газу від таких шкідливих домішок:

- CO₂ – вуглекислий газ;
- CH₂O – пари формальдегіду;
- пилу.

Дані, отримані в результаті дослідів, було занесено до таблиць (табл. 1-3) та побудовано графіки (рис. 1-6) для порівняння ефективності нової насадки. З рис. 5 і 6 бачимо, що трикутна насадка с хрестоподібними вирізами дає найвищий результат очищення коксового газу від пилу – 0,45 мг/м³, що наближається до санітарної норми. Це краще ніж середній результат для скрубєрів насадкового типу при пилоочищенні – 0,5...1 мг/м³. Однак, доцільно знайти оптимальну температуру коксового газу для очищення від пилу.

Таблиця 1
Концентрація CO₂ в охолодженому до 15 °С коксовому газі

№	Концентрація CO ₂ , %, при типі насадки скрубєра					
	хордова дерев'яна		кільця Рашига		Трикутна з хрестоподібними вирізами	
	до	після	до	після	до	після
1	0,32	0,21	0,32	0,20	0,32	0,18
2	0,33	0,21	0,33	0,19	0,33	0,18
3	0,31	0,21	0,31	0,20	0,31	0,17
4	0,31	0,21	0,31	0,20	0,31	0,17
5	0,34	0,22	0,34	0,20	0,34	0,18
6	0,31	0,21	0,31	0,20	0,31	0,18

Таблиця 2
Концентрація CH₂O в охолодженому до 15 °С коксовому газі

№	Концентрація CH ₂ O, %, при типі насадки					
	хордова дерев'яна		кільця Рашига		Трикутна з хрестоподібними вирізами	
	до	після	до	після	до	після
1	0,81	0,52	0,81	0,48	0,81	0,42
2	0,78	0,51	0,78	0,47	0,78	0,41
3	0,79	0,52	0,79	0,48	0,79	0,42
4	0,79	0,51	0,79	0,47	0,79	0,41
5	0,80	0,51	0,80	0,47	0,80	0,41
6	0,80	0,51	0,80	0,47	0,80	0,41

Таблиця 3
Концентрація пилу в охолодженому до 15 °С коксовому газі

№	Концентрація пилу, мг/м ³ , при типі насадки					
	Хордова дерев'яна		Кільця Рашига		Трикутна з хрестоподібними вирізами	
	до	після	до	після	до	після
1	0,71	0,56	0,71	0,52	0,71	0,45
2	0,70	0,54	0,70	0,50	0,70	0,43
3	0,70	0,55	0,70	0,51	0,70	0,44
4	0,70	0,55	0,71	0,50	0,70	0,44
5	0,71	0,51	0,71	0,47	0,71	0,41
6	0,71	0,51	0,71	0,47	0,71	0,41

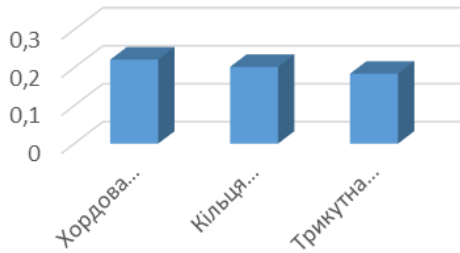


Рис 1. Діаграма концентрації CO₂ після очищення, %



Рис 2. Діаграма ефективності очищення CO₂, %

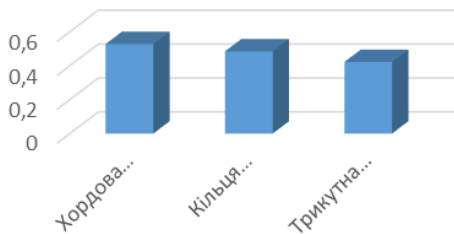


Рис 3. Діаграма концентрації CH₂O, мг/м³, після очищення

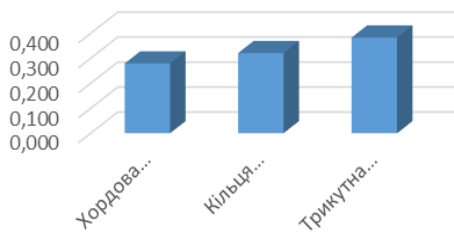


Рис 4. Діаграма ефективності очищення CH₂O, мг/м³

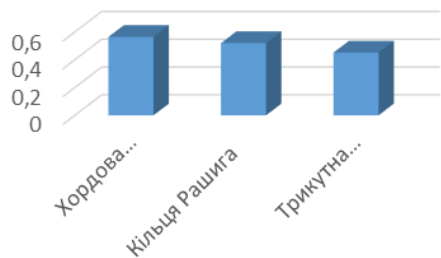


Рис 5. Діаграма концентрації пилу, мг/м³, після очищення

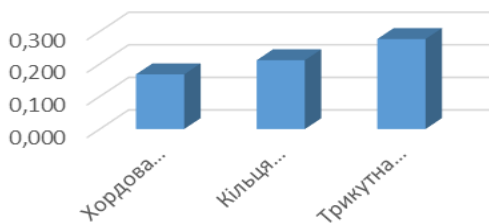


Рис 6. Діаграма ефективності очищення пилу, мг/м³

Для визначення оптимальної температури процесу проведемо розрахунок кількості пилу

після очищення в скрубєрі з новою насадкою залежно від температури та тиску. Вміст пилу в коксовому газі наведено у табл. 4. За отриманими даними побудуємо рівняння регресії (рис. 7):

$$t = 137,6169 - 555,7407 q - 0,0036 \Delta p + 616,2683 q^2 + 0,0083 q \Delta p - 1,5947 \cdot 10^{-7} \Delta p^2. \quad (7)$$

Таблиця 4.

t, °C	Вміст пилу (мг/м ³) при заданому тиску				
	1000	500	1000	1500	2000
10	0,450	0,428	0,421	0,420	0,415
15	0,452	0,431	0,422	0,421	0,419
20	0,586	0,575	0,572	0,564	0,564
25	0,607	0,596	0,593	0,585	0,585
30	0,628	0,617	0,614	0,606	0,606
35	0,649	0,638	0,635	0,627	0,627
40	0,670	0,659	0,656	0,648	0,648
45	0,691	0,680	0,677	0,669	0,669
50	0,712	0,701	0,698	0,690	0,690

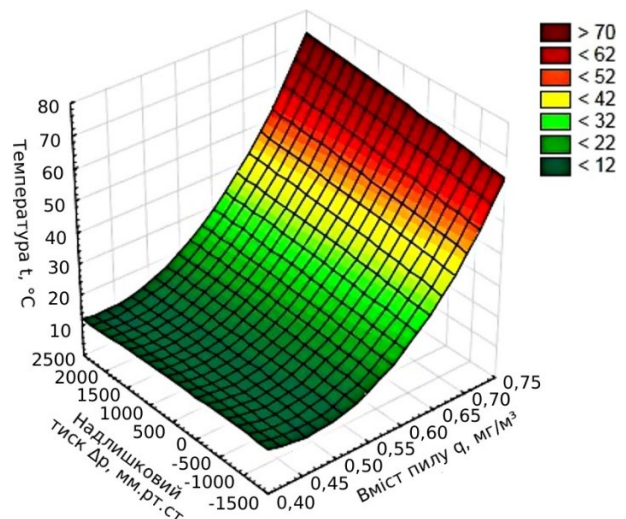


Рис 7. Регресійний графік залежності вмісту пилу від температури та тиску

З рис. 7 оптимальною температурою є 15°C.

Висновки. У проведеному експерименті доведено ефективність нової насадки при очищенні коксового газу від CO₂ (вуглекислого газу), CH₂O (парів формальдегіду) та пилу. Так, зокрема, нова насадка покращує очищення на 25 % порівняно з дерев'яною хордовою (її прототип) та на 15 % порівняно з кільцями Рашига, що є однією з найефективніших насадок та близька за матеріалом до нової насадки. Також було доведено, що оптимальною температурою для усіх типів домішок є 15°C.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому важливо дослідити процес очищення інших домішок.

Література

1. Алексеев В. Аппараты вихревого типа, применяемые для мокрой очистки газов / В. Алексеев, В. Булкин, И. Поникаров, А. Галлеев. – Казань, 1987. – 22 с.
2. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справочник / Г.М.-А. Алиев. – Москва: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
3. Андоньев С. Пылегазовые выбросы предприятий чёрной металлургии / С. Андоньев, О. Филиппев О. – Москва: Metallurgiya, 1979. – 60 с.
4. Апостолук С.О. Промислова екологія: навч. посіб. / С.О. Апостолук, В.С. Джигирей, І.А. Соколовський та ін. – 2-ге вид., виправл. і доповн. – Київ: Знання, 2012. – 430 с.
5. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: Учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
6. Диденко В. Интенсификация обеспыливания и очистки вентиляционных выбросов на основе вихревых эффектов / В. Диденко, Т. Малахова. – Волгоград: Волгогр. Гос. Архит.-строит. Акад., 1998. – 144 с.
7. Дытнерский Ю. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Ю. Дытнерский. – Москва: Химия, 1991. – 496 с.
8. Козлова С.А. Оборудование для очистки газов промышленных печей: Электронный конспект лекций / С.А. Козлова, И.М. Шалаев, О.В. Раева, А.В. Киселев. – Красноярск: СФУ, 2007. – 156 с., dpi 300, OCR, навигатор. Источник: lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/217/u_lectures.pdf
9. Коробчанский И.Е. Расчёты аппаратуры для улавливания химических продуктов коксования / И.Е. Коробчанский, Кузнецов М.Д. – Москва: Metallurgiya. 1972, 2-е изд., 296 с.
10. Михайлов Н.В. К вопросу о концентрации нафталина в коксовом газе / Н.В. Михайлов, В.М. Зайченко, П.П. Коломиец // Кокс и химия. – 1969. – № 12. – С. 26-29.
11. Лебедева Г.Н. Возможная степень очистки коксового газа от нафталина при первичном охлаждении / Г.Н. Лебедева, Н.Г. Бунаков, В.С. Патрикеев // Кокс и химия. – 1973. – № 6. – С. 37-40.
12. Вшивцев В.Г. Хроматографическое определение нафталина в аэрозолях каменноугольной смолы коксового газа / В.Г. Вшивцев, Т.К. Сафронова, Л.Г. Носова // тематический отраслевой сборник: Вопросы технологии улавливания и переработки продуктов коксования. – № 7. – Москва: Metallurgiya, 1978. – С. 91-93.
13. Бродович А.И. Новые схемы очистки коксового газа / А.И. Бродович, В.М. Зайченко, В.И. Мелженцева и др. // Кокс и химия. – 1980. – № 4. – С. 28-32.

References

1. Alekseev V., Bulkin V., Ponikarov I., Galleev A. *Apparaty vihrevogo tipa, primenyayemye dlya mokroy ochistki gazov*, Kazan, 1987.
2. Aliev G.M.-A. *Tehnika pyileulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov*, Metallurgiya, 1986.
3. Andonev S., Filipev O. *Pyilegazovyye vyibrosyi predpriyatiy chernoy metallurgii*, Metallurgiya, 1979.
4. Apostolyuk S.O., Dzhigirei V.S., Sokolovskiy I.A. *Promislova ekologiya*, Znannya, 2012.
5. Vetoshkin A.G. *Protsessyi i apparaty pyileochistki*, Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2005.
6. Didenko V., Malahova T. *Intensifikatsiya obespylivaniya i ochistki ventilyatsionnykh vyibrosov na osnove vihrevykh effektov*, Volgogr. Gos. Arhit.-stroit. Akad., 1998.
7. Dyitnerskiy Yu. *Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii*, Himiya, 1991.
8. Kozlova S.A., Shalaev I.M., Raeva O.V., Kiselev A.V. *Oborudovanie dlia ochistki gazov promyshlennykh pechei: Elektronnyi konspekt lektzii*, SFU, 2007, dpi 300, OCR, lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/217/u_lectures.pdf
9. Korobchanskii I.E., Kuznetsov M.D. *Raschety apparatury dlia ulavlivaniia khimicheskikh produktov koksovaniia*, Metallurgiya, 1972.
10. Mikhailov N.V., Zaychenko V.M., Kolomiets P.P. "On the concentration of naphthalene in a coke oven gas." *Koks i khimiia*, no. 12, 1969, pp. 26-29.
11. Lebedeva G.N., Bunakov N.G., Patrickeyev B.C. "Vozmozhnaia stepen ochistki koksovogo gaza ot naftalina pri pervichnom okhlazhdenii." *Koks i khimiia*, no. 6, 1973, pp. 37-40.
12. Vshivtsev V.G., Safronova T.K., Nosova L.G. "Chromatographic determination of naphthalene in aerosols of coal tar resin of coke oven gas." *Problems of technology of capture and processing of coking products*, no. 7, 1978.
13. Brodovich A.I., Zaychenko V.M., Melzhentseva V.I. and other "Novye skhemy ochistki koksovogo gaza." *Koks i khimiia*, no. 4, 1980, pp. 28-32.

УДК 697.942

Повышение эффективности очистки коксового газа от пыли, углекислого газа и паров формальдегида в скрубберах насадочного типа.

А. Ф. Редько¹, Ю. И. Чайка², Ю. А. Бурда³

¹д.т.н., проф. Харьковський національний університет будівництва та архітектури, Харків, Україна, redko.af@gmail.com ORCID 0000-0002-9375-1262

²к.т.н., проф. Харьковський національний університет будівництва та архітектури, Харків, Україна, yuri.chayka@gmail.com ORCID 0000-0001-7556-6306

³аспірант Харьковський національний університет будівництва та архітектури, Харків, Україна, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Аннотация. В данной работе приведены результаты промышленных испытаний новой треугольной насадки с крестообразными отверстиями при очистке коксового газа от пыли, углекислого газа и паров формальдегида. По этим данным были построены сравнительные диаграммы и график регрессии. В работе рассмотрены результаты собственных экспериментов, которые сравнивались с результатами других авторов и различными статистическими данными. Для сравнения приняты деревянная хордовая насадка и наиболее эффективная по статистическим данным – кольца Рашига. Результаты проверки совпадают с теоретическими расчётами и подтверждают эффективность новой насадки. Доказана эффективность новой насадки при очистке коксового газа от CO₂ (углекислого газа), CH₂O (паров формальдегида) и пыли. Новая насадка улучшает очистку на 25 % по отношению к деревянной хордовой (её прототип) и на 15 % по сравнению с кольцами Рашига, которые являются одной из самых эффективных насадок, и близкие по материалу к новой насадке. Также было доказано, что оптимальной температурой для всех типов примесей является 15 °С.

Ключевые слова: скруббер, коксовый газ, углекислый газ, пары формальдегида, очистка от пыли, промышленные испытания, выбросы в атмосферу, насадка, коксовая промышленность.

UDC 697.942

Increasing the Efficiency of Cleaning Coke Oven Gas from Dust, Carbon Dioxide and Formaldehyde Vapors in Scrubbers of the Attachment Type.

O. Redko¹, Y. Chayka², Y. Burda³

¹Sc.D, professor, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²Sc.D, a.P, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, yuri.chayka@gmail.com ORCID 0000-0001-7556-6306

³PhD student Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, malafiko@gmail.com, ORCID 0000-0003-3470-1334

Abstract. In this paper, the results of industrial tests of a new triangular attachment with cross-holes for cleaning coke oven gas from dust, carbon dioxide and formaldehyde vapours are given. According to these data, comparative diagrams and regression charts are constructed. The paper considers the results of own experiments, which compared with the results of other scientists and various statistical data. For comparison, a wooden chord attachment and the most effective Rashig ring attachment are used. The results of the tests coincide with the theoretical calculations and confirm the effectiveness of the new attachment. The efficiency of the new attachment is proven for the purification of coke oven gas from CO₂ (carbon dioxide), CH₂O (formaldehyde vapours) and dust. The new attachment improves the cleaning by 25 % with respect to the wooden chord (its prototype) and by 15 % compared to the Raschig rings, which are one of the most effective attachments, and close to the material for the new one. It is proved that the optimum temperature for all types of impurities is 15 °C.

Key words: scrubber, coke oven gas, carbon dioxide, formaldehyde pairs, dust treatment, industrial tests, atmospheric emissions, attachment, coke industry.

Надійшла до редакції / Received 24.11.2017

УДК 697.33

Логіко-ймовірнісна оцінка ризиків аварій на трубопроводах теплових мереж

Г. С. Ратушняк¹, М. В. Свідеревич²

¹к.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ratusnagk@gmail.com

²асп. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, maryna.bt09@i.ua

Анотація. Для багатофакторного аналізу впливу різних факторів на експлуатаційну надійність теплових мереж потрібно застосовувати теорію нечіткої логіки та теорію ймовірностей. Методика логіко-ймовірнісної оцінки ризиків аварій дозволяє виконувати вибір рішення щодо підвищення ефективності систем теплопостачання та впровадження новітніх енергоефективних технологій при їхній реконструкції. За результатами аналізу експертних оцінок виникнення небезпечних ситуацій на трубопровідній частині системи теплопостачання розроблено узагальнену схему розвитку можливої аварії з урахуванням факторів, що впливають на надійність системи в цілому. Отримано значення нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж $P^*=(0,178;0,657;0,304;0,400)$. Оцінка дерева відмов дозволяє визначити появу події, яка може призвести до небажаного порушення роботи системи теплопостачання. Експериментальні дані спостереження за змінами вихідного показника (характеристик теплової мережі) при варіації факторів впливу за розробленою методикою дає можливість уточнювати обґрунтування прийняття рішень при управлінні надійністю системи централізованого теплопостачання з урахуванням кількісних і якісних параметрів об'єкта.

Ключові слова: надійність теплових мереж, нечітка логіка, теорія ймовірностей, дерево відмов, схема розвитку аварії.

Вступ. Безпечна експлуатація трубопроводів теплових мереж залежить від середовища, в якому вони працюють, величини тиску та температури перегрітої пари й гарячої води. Аварії трубопроводів теплових мереж виникають через низьку якість металу, незадовільне виконання монтажних і зварювальних робіт, фланцевого з'єднання або несправність арматури, контрольно-вимірювальних приладів, низьку кваліфікацію персоналу, який обслуговує обладнання теплової мережі. Складність забезпечення надійності при експлуатації трубопроводів полягає в тому, що вони мають різноманітну конфігурацію та велику кількість з'єднань трубопровідної арматури [1, 2].

Основними причинами високої аварійності при експлуатації трубопроводів є скорочення ремонтних потужностей, низькі темпи робіт із заміни трубопроводів, строк експлуатації яких вичерпано, на трубопроводи з антикорозійними покриттями, а також старіння мереж [3]. Особливо велика кількість аварій відбувається в містах у результаті витоків води із зношених комунікацій. Із зруйнованих трубопроводів вода просочується до ґрунту, підвищується рівень ґрунтових вод, виникають провали й осідання ґрунту, що веде до затоплення фундаментів. При загальній динаміці аварійності, за оцінками експертів, причинами розриву трубопроводів є: 60% випадків – гідроудари, перепади тиску та вібрації; 25% – корозійні процеси; 15% – приро-

дні явища та форс-мажорні обставини. Основними причинами аварій на магістральних трубопроводах протягом 2001...2016 рр. стали: зовнішні впливи – 4,3 % від їхньої загальної кількості); брак при будівництві – 23,2 %; зовнішня корозія – 22,5 %; брак при виготовленні труб і обладнання на заводах – 14,1 %; помилкові дії персоналу – 3%. Основна причина аварій на внутрішньопромислових трубопроводах – розриви труб, викликані внутрішньою корозією [4].

Актуальність досліджень. Технічний стан експлуатованих 20...30 років трубопровідних систем залишає бажати кращого. Заміна зношеного обладнання та трубопроводів арматури ведеться низькими темпами. Тому спостерігається тенденція збільшення аварійності на трубопроводному транспорті щороку на 7...9 %. Це свідчить про зменшення надійності системи теплопостачання в цілому. У зв'язку з цим виникає необхідність вчасного достовірного прогнозування виникнення небезпечних ситуацій на трубопроводах систем теплопостачання.

Останні дослідження та публікації. Проблеми підвищення надійності та строку служби трубопроводів досліджували І. Р. Малахова та Б. С. Федосєєв [5]. Питанням подовження строку функціонування мереж теплопостачання присвячені роботи українських та іноземних вчених О. О. Іоніна, М. К. Громова, М. М. Зингера, Е. В. Сазонова, Є. Є. Нікітіна, І. І. Капцова та С. Й. Ткаченка [6].

Артамонов Є. Б. розглядає підвищення надійності роботи теплових мереж за рахунок дистанційного визначення несправних ділянок в умовах невизначеності або нечіткості параметрів теплових мереж [7]. Кононовою М. С. у роботі [8] на основі обраної моделі процесу руйнування металу теплопроводів розроблена методика обробки статистичної інформації про пошкоджуваність теплопроводів теплових мереж.

У роботах [9-11] наведені результати визначення показників надійності теплопроводів з використанням методів статистичного моделювання. Авторами досліджуються залежності параметру потоку відмов, час напрацювання на відмову й імовірність безвідмовної роботи залежно від строку експлуатації теплопроводів теплопостачання: подавального, зворотного і теплопроводів гарячого водопостачання.

У [12-15] одержано залежності часу напрацювання на відмову для теплопроводів теплових мереж та побудовано графіки залежності часу напрацювання на відмову видів пошкоджень: свищів, поривів, засувок та інших пошкоджень теплопроводу від строку експлуатації теплових мереж. У [16] уточнено фізико-математичну модель формування параметра потоку відмов теплопроводів з урахуванням впливу окремих руйнівних факторів і їхньої сукупності та розроблено інженерну методику прогнозування параметра потоку відмов.

Більшість розроблених методик прогнозування відмов тепломереж визначають рівень надійності теплопроводів на стадії проектування. Це дозволяє використовувати їх при експлуатації мереж для розробки графіків планово-попереджувальних ремонтів. Однак, відсутність даних щодо пошкоджень теплопроводів за значний період їхньої експлуатації не дозволяє використовувати вказані методики для розрахунку показників надійності теплопроводів на значний період їхньої експлуатації. При прогнозуванні виникнення аварійної ситуації на тепломережі необхідно враховувати не тільки проектну, а й експлуатаційну надійність теплопроводів.

Формування мети дослідження. Метою роботи є розроблення логіко-ймовірнісної оцінки ризиків аварій на теплопроводах теплових мереж з використанням нечіткої логіки лінгвістичних змінних та теорії ймовірностей. Це дозволить більш об'єктивно оцінювати ризик аварії і, відповідно, пропонувати рішення, які будуть направлені на запобігання аварій та підвищення надійності теплопроводів теплових мереж.

Основна частина. Оскільки об'єктом дослідження обрано теплопровідну частину системи

теплопостачання, то узагальнену схему розвитку можливої аварії з урахуванням усіх факторів, що впливають на надійність системи в цілому, наведено на рис. 1.

Відповідно до узагальненої структурної схеми причин і наслідків розвитку аварій на теплопроводах теплових мереж (рис. 1), розроблення моделі прогнозування надійності системи визначається ідентифікацією об'єкта з одним виходом і багатьма входами. Для лінгвістичної оцінки ризиків взаємозв'язок змінних вхід-вихід задається у вигляді експертних висновків: ЯКЩО «входи», ТО «вихід», які утворюють нечіткі бази знань [17].

Для заданої системи теплопостачання вхідними є фактори, які впливають на надійність теплових мереж [18]. Вихідна змінна – імовірність виникнення аварії на теплопровідній частині системи теплопостачання в результаті зменшення її надійності. Фактори впливу на надійність теплових мереж об'єднано в три групи залежно від основних характеристик (рис.1). До групи факторів, які найбільше піддаються впливу несприятливих зовнішніх умов (група А) віднесено: x_1 – товщина стінки теплопроводу; x_2 – тип ізоляції; x_3 – корозія; x_4 – зміна електрохімічного захисту. До групи факторів, які найбільше піддаються впливу зовнішніх пошкоджень (група В), віднесено: x_5 – діаметр теплопроводу, x_6 – спосіб прокладання теплопроводу, x_7 – приховані дефекти. До групи факторів, які найбільше піддаються динамічним навантаженням (група С), віднесено: x_8 – термін експлуатації 5...26 років, x_9 – подавальні теплопроводи, x_{10} – зворотні теплопроводи, x_{11} – вплив тиску теплоносія. Оцінку значень функцій належностей лінгвістичних змінних, якими є фактори впливу на надійність теплових мереж, проводимо за допомогою системи якісних термів: Н – низька; нС – нижче середнього; С – середня; вС – вище середнього; В – висока. За допомогою вхідної інформації та її лінгвістичних змінних на основі логічних операцій виконується структурна ідентифікація об'єкта "вхід-вихід".

Через велику кількість вхідних змінних побудова нечіткої бази знань ускладнюється. Для спрощення задачі використано дерево відмов, яке дає чітке уявлення про причинно-наслідкові зв'язки ризиків зниження надійності на теплопроводах теплових мереж [19]. Також використання дерева відмов дозволяє при аналізі виділити й обмежитися елементами систем і подій, що призводять до даної конкретної відмови. Узагальнене дерево відмов для теплопроводів теплових мереж наведено на рис. 2.

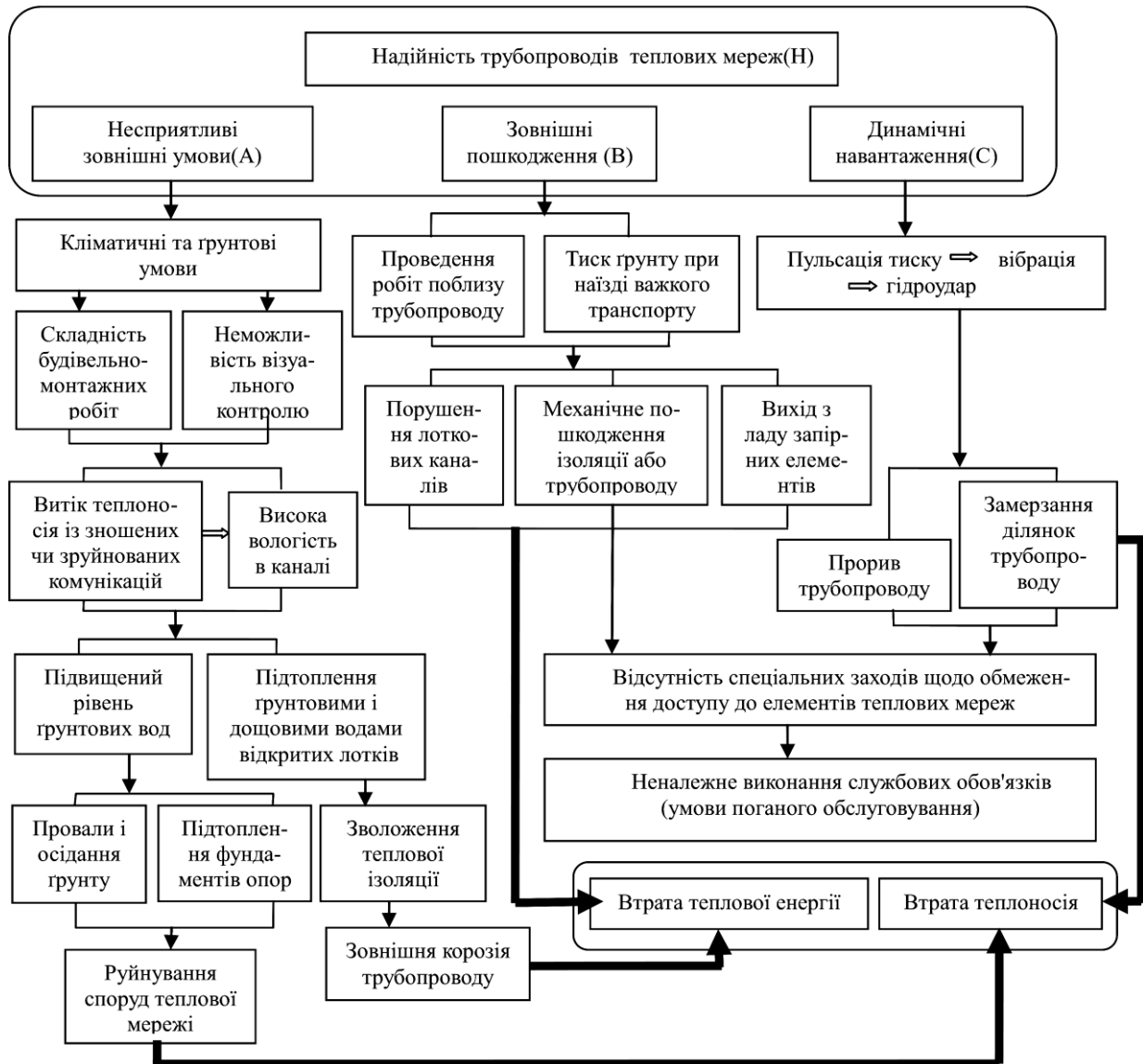


Рис. 1. Узагальнена структурна схема причин та наслідків розвитку аварії на трубопроводах теплових мереж

При побудові узагальненого дерева відмов імовірнісного аналізу ризиків, що сприяють виникненню аварій на трубопроводах теплових мереж, прийнято позначення факторів відповідно до структурної схеми причин та наслідків розвитку аварій на трубопроводах теплових мереж (рис. 1).

Імовірність відмови трубопроводів теплових мереж $P(t)$ на будь-якому рівні для входів АБО дерева відмов може бути розраховано за допомогою наступного рівняння [20]:

$$P_n = \left[\left(\prod_{i=1}^L P_{n-1}^i \right) \vee \left(\prod_{i=1}^L P_{n-1}^i \right) \right], \quad (1)$$

де P_n – нечітка ймовірність виникнення події на n -му рівні; P_{n-1}^i – нечітка ймовірність виникнення i -ої події на $n-1$ рівні; $i=1 \dots L$ – кількість подій даного рівня.

Для оцінки адекватності отриманих результатів визначено ймовірності виникнення ситуації, що призведе до зниження надійності трубопроводу та в подальшому може спровокувати виникнення аварії.

Одержані в результаті розрахунків функції належностей факторів впливу на надійність трубопроводів теплових мереж є оцінкою ймовірності базових подій дерева відмов і позначено як P_{x1}, \dots, P_{x11} (табл. 1).

Імовірності для головної події в дереві відмов визначаються із співвідношень (2-5) (табл. 2):

$$P_A = 1 - (1 - 0,102) \cdot (1 - 0,154) \times (1 - 0,184) \cdot (1 - 0,033) = 0,4;$$

$$P_B = 1 - (1 - 0,121) \cdot (1 - 0,032) \cdot (1 - 0,034) = 0,178;$$

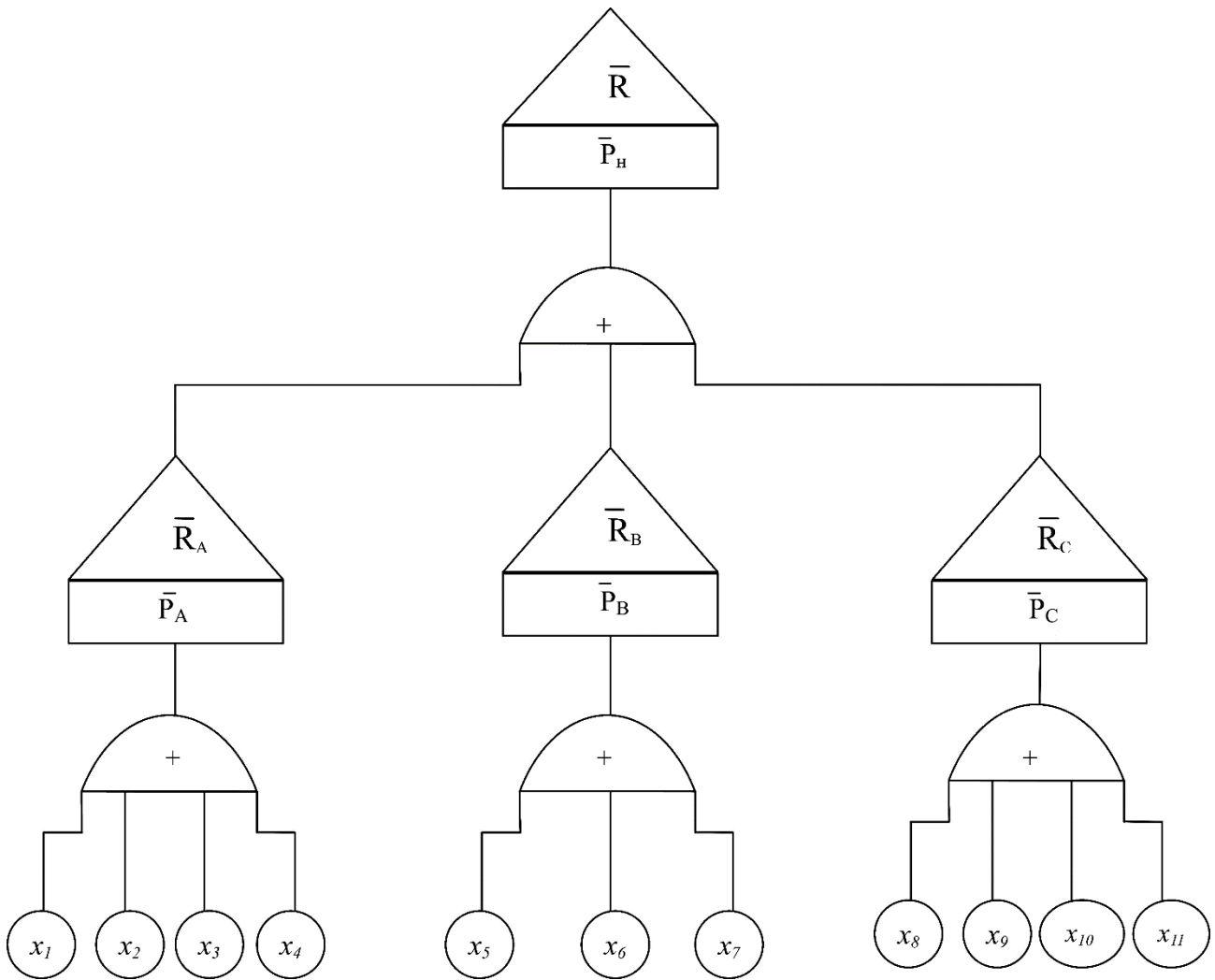


Рис. 2. Узагальнене дерево відмов, що сприяють виникненню аварій на трубопроводах теплових мереж

$$P_C = 1 - (1 - 0,187) \cdot (1 - 0,043) \times (1 - 0,03) \cdot (1 - 0,078) = 0,304;$$

$$P_H = 1 - (1 - 0,4) \cdot (1 - 0,178) \cdot (1 - 0,304) = 0,657.$$

Значення границь нечітких імовірностей прийнято:

- ймовірність впливу групи факторів A на виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж (P_A) виступає верхньою границею нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на першому рівні ($q_1^{верх}$);
- ймовірність впливу групи факторів C на виникнення аварійної ситуації (P_C) виступає нижньою границею нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на одиничному рівні ($q_1^{нижн}$);

- P_H є верхньою границею нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на нульовому рівні ($q_0^{верх}$);
- P_B - ймовірність впливу групи факторів B на виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж – є нижньою границею нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на нульовому рівні ($q_0^{нижн}$) [21].

Таким чином, маємо наступне значення нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж

$$P^- = (0,178; 0,657; 0,304; 0,400).$$

Функцію належності для нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж P_H наведено на рис.3.

Таблиця 1

Власні вектори та вектори пріоритетів матриці для порівняння відносної ваги елементів на другому рівні по відношенню до загальної мети на першому рівні

	Власний вектор	Вектор пріоритету ($\sum P \leq 1$)
Рядок 1 (x_1 - товщина стінки трубопроводу)	$m_1 = 2,43$	$P_1 = 0,187$
Рядок 2 (x_2 - тип ізоляції)	$m_2 = 0,56$	$P_2 = 0,043$
Рядок 3 (x_3 - корозія)	$m_3 = 0,40$	$P_3 = 0,03$
Рядок 4 (x_4 - зміна електрохімічного захисту)	$m_4 = 1,57$	$P_4 = 0,121$
Рядок 5 (x_5 - діаметр трубопроводу)	$m_5 = 1,33$	$P_5 = 0,102$
Рядок 6 (x_6 - спосіб прокладання трубопроводу)	$m_6 = 0,41$	$P_6 = 0,032$
Рядок 7 (x_7 - приховані дефекти)	$m_7 = 2,0$	$P_7 = 0,154$
Рядок 8 (x_8 - термін експлуатації 5-26 років)	$m_8 = 2,39$	$P_8 = 0,184$
Рядок 9 (x_9 - подавальні трубопроводи)	$m_9 = 0,44$	$P_9 = 0,034$
Рядок 10 (x_{10} - зворотні трубопроводи)	$m_{10} = 1,01$	$P_{10} = 0,078$
Рядок 11 (x_{11} - вплив тиску теплоносія)	$m_{11} = 0,43$	$P_{11} = 0,033$
	$\sum m = 12,97$	$\sum P = 0,998$

Таблиця 2

Формули розрахунку ймовірностей подій

Номер рівня	Вихідна подія	Логічна операція	Формула розрахунку
1	A	АБО	$P_A = 1 - (1 - P_{x1}) \cdot (1 - P_{x2}) \cdot (1 - P_{x3}) \cdot (1 - P_{x4})$ (2)
1	B		$P_B = 1 - (1 - P_{x5}) \cdot (1 - P_{x6}) \cdot (1 - P_{x7})$ (3)
1	C		$P_C = 1 - (1 - P_{x8}) \cdot (1 - P_{x9}) \cdot (1 - P_{x10}) \cdot (1 - P_{x11})$ (4)
2	H		$P_H = 1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_B) \cdot (1 - P_C)$ (5)

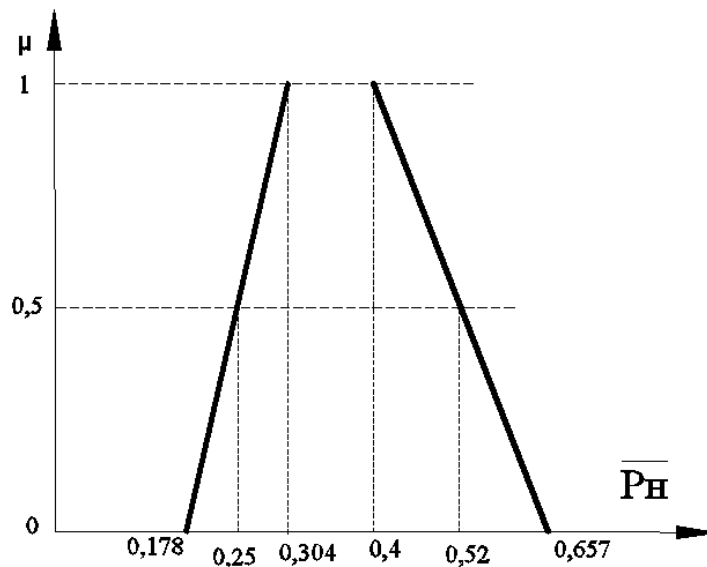


Рис. 3. Функція належності для нечіткої ймовірності виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж P_H

Висновки. Аналіз функції належності (рис. 3) свідчить, що нижня оцінка виникнення аварійної ситуації на трубопроводах теплових мереж при відповідних вхідних даних про їх технічний стан $P_{\text{нижн}} = 0,178$ та верхня $P_{\text{верх}} = 0,657$. Найбільш ймовірний діапазон оцінок виникнення аварій на трубопроводах відповідно до узагальненого дерева відмов (рис. 2) становить в межах від 0,25 до 0,52. Запропонована модель оцінки ризиків дозволяє

розробляти організаційно-технічні рішення щодо зменшення ймовірності виникнення аварійної ситуації.

Перспективи подальших досліджень. Доцільним є проведення натурного експерименту для уточнення експертних значень лінгвістичних змінних, що впливають на параметри функціонування теплових мереж і виникнення аварійних ситуацій на трубо-провідній частині системи теплопостачання.

Література

1. Правила будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води: НПАОП 0.00-1.11-98. – Чинний від 2007-10-01. – Комітет з нагляду за охороною праці М-ва праці та соц. політики України: із змінами від 2007-10-01. – Харків: Індустрія, 2008. – 128 с.
2. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. – Чинний від 2009-07-01. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 149 с.
3. Євтухова Т. О. Сучасний стан комунальної енергетики України / Т. О. Євтухова // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №17. – С. 31-36.
4. Кулик М. М. Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні / М. М. Кулик, Г. О. Куц, В. Д. Білодід // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №14. – С. 13-24.
5. Федосеев Б. С. О нормах водно-химического режима для теплосети / Б. С. Федосеев // Теплоэнергетика. – 1994. – №8. – С. 76-80.
6. Капцов І. І. Аналіз пошкоджуваності теплопроводів і трубопроводів гарячого водопостачання теплових мереж / І. І. Капцо, О. М. Лобко / Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2010. – Вип. 14. – С. 61-65.
7. Артамонов Є. Б. Методи і алгоритми діагностування стану ділянок теплових мереж: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Артамонов Є. Б.; Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – Київ, 2011. – 20 с.
8. Кононова М. С. Прогнозирование состояния трубопроводов тепловых сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Кононова М. С.; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Воронеж, 2000. – 22 с.
9. Умеркин Г. Х. Определение остаточного ресурса тепловых сетей по статистическим данным об авариях / Г. Х. Умерки, С. А. Дроздов, А. М. Гончаров, Н. Н. Демиденко // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 11. – С. 42-46.
10. Соколов Е. Я. Количественный расчет надежности систем теплоснабжения / Е. Я. Соколов, А. В. Извеков // Теплоэнергетика. – 1990. – № 9. – С. 14-15.
11. Соколов Е. Я. Нормирование надежности систем централизованного теплоснабжения / Е. Я. Соколов, А. В. Извеков, В. А. Малофеев // Электрические станции. – 1993. – № 12. – С. 20-24.
12. Малявіна О. М. Дослідження показників надійності теплових мереж методами статистичного моделювання / О. М. Малявіна // Науковий вісник будівництва: наук.-техн. зб./ ХДТУБА. – Харків, 2010. – Вип. 61. – С. 286-291.
13. Лобко О. М. Методика вибору шагу експлуатації теплопроводів при дослідженні їх пошкоджуваності / О. М. Лобко // Науковий вісник будівництва: наук.-техн. зб. / ХДТУБА. – Харків, 2010. – Вип.58. – С. 196-202.
14. Сазонов Э. В. Сравнительный анализ эмпирических функций распределения отказов городских теплопроводов / Э. В. Сазонов, М. С. Кононова // Известия вузов: Строительство. – 2000. – № 7-8. – С. 85-87.
15. Сазонов Э. В. Реализация метода прогнозирования состояния трубопроводов тепловых сетей на ЭВМ // Э. В. Сазонов, А. А. Кононов, М. С. Кононова // Изв. вузов: Строительство. – 2001. – № 7. – С. 68-70.
16. Плавич А. Ю. Оценка и обеспечение уровня надежности водяных тепловых сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Плавич А. Ю.; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород. – РГБ, 2005. – 17 с.
17. Ротштейн О. П. Интеллектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О.П. Ротштейн. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
18. Ратушняк Г. С. Оцінювання впливу конструктивних характеристик теплових мереж на їх надійність з використанням нечіткої логіки / Г. С. Ратушняк, М. В. Свідеревич // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2017. – №1 (22). – С. 41-48.
19. Копей Б. В. Використання “дерева відмов” як методу структурного аналізу штангової насосної установки / Б. В. Копей, В. Б. Копей, О. Р. Мартинець, О. І. Стефанишин, А. Б. Стефанишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 2(47). – С. 62-71.
20. Хобта В. М. Оптимізація вибору технології будівництва як засобу підвищення конкурентоспроможності будівельних підприємств / В. М. Хобта, О. І. Кісельова // Теоретичні і прикладні питання економіки: зб. наук. пр. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. – Вип. 16. – С. 36-46.
21. Кравець В. О. Аналіз методів побудови функцій приналежності при обробці експертних знань / В. О. Кравець, В. В. Шевцова, А. В. Савченко / Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 52 (958). – С. 126-132.

References

1. Pravyła budovy i bezpechnoi ekspluatatsii truboprovodiv pary ta hariachoi vody. NPAOP 0.00-1.11-98, Industriia, 2008.
2. Inzhenerne obladnannya budynkiv i sporud. Zovnishni merezhi ta sporudy. Teplovi merezhi. DBN V.2.5-39:2008, Minrehionbud Ukrainy, 2008.
3. Yevtukhova T. O. "Suchasnyi stan komunalnoi enerhetyky Ukrainy." Problemy zahalnoi enerhetyky, no. 17, 2008.
4. Kulyk M. M. "Analiz stanu rozvytku system teplopостachannya v Ukraini." Problemy zahalnoi enerhetyky, no. 14, 2006.
5. Fedoseev B. S. "O normakh vodno-khymycheskoho rezhyma dlia teplosety." Teploenerhetyka, no. 8, 1994.
6. Kaptsov I. I. "Analiz poshkodzhuvanosti teploprovodiv i truboprovodiv hariachoho vodopostachannia teplovykhmerzh." Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohapostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Iss. 14, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2010, pp. 61-65.
7. Artamonov Ye. B. Metody i alhorytmy diahnostuvannya stanu dilyanok teplovykh merzh. Diss. abstract. Instytut problem matematychnykh mashyn i system NAN Ukrainy, 2011.
8. Kononova M. S. Prognozirovanie sostoyaniya truboprovodov teplovi setey. Diss. abstract. Voronezhskiy gosudarstvenniy arhitekturno-stroitelniy universitet, 2000.
9. Umerkin G. H. "Opredelenie ostatochnogo resursa teplovi setey po statisticheskim dannim ob avariayah." Novosti teplosnabzheniya, no. 11, 2007.
10. Sokolov E. Ya. "Kolichestvenniy raschet nadezhnosti sistem teplosnabzheniya." Teploenergetika, no. 9, 1990.
11. Sokolov E. Ya., Izvekova A. V., Malofeev V. A. "Normirovanie nadezhnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya." Elektricheskie stantsii, no. 12, 1993.
12. Maliavina O. M. "Doslidzhennia pokaznykiv nadiinosti teplovykh merzh metodamy statystychnoho modeliuвання." Naukovyi visnyk budivnytstva: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, KhDTUBA, Kharkiv, 2010, no. 61, pp. 286-291.
13. Lobko O. M. "Metodyka vyboru shahu ekspluatatsii teploprovodiv pry doslidzhenni yikh poshkodzhuvanosti." Naukovyi visnyk budivnytstva: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Kharkiv, 2010, no. 58, pp. 196-202.
14. Sazonov E. V., Kononova M. S. "Sravnitelniy analiz empiricheskikh funktsiy raspredeleniya otkazov gorodskih teploprovodov." Izvestiya vuzov: Stroitelstvo, no. 7-8, 2000, pp. 85-87.
15. Sazonov E. V., Kononov A. A., Kononova M. S. "Realizatsiya metoda prognozirovaniya sostoyaniya truboprovodov teplovi setey na EVM." Izvestiya vuzov: Stroitelstvo, no. 7, 2001, pp. 68-70.
16. Plavich A. Yu. Otsenka i obespechenie urovnya nadezhnosti vodyanykh teplovi setey. Diss. abstract. Nizhegorodskiy gosudarstvenniy arhitekturno-stroitelniy universitet, 2005.
17. Rotshtein O.P. Intelektualni tekhnolohii identyfikatsii: nechitki mnozhyny, henetychni alhorytmy, neironni merezhi. Universum-Vinnytsia, 1999.
18. Ratushnyak H. S., Sviderevych M. V. "Otsinyuvannya vplyvu konstruktyvnykh kharakterystyk teplovykh merzh na yikh nadiinist z vykorystanniam nechitkoi lohiky." Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi, UNIVERSUM-Vinnytsia, no.1 (22), 2017, pp.41-48.
19. Kopei B. V. "Vykorystannia "dereva vidmov" yak metodu strukturnoho analizu shtanhovoi nasosnoi ustanovky." Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch, no. 2(47), 2013, pp. 62-71.
20. Khobta V. M., Kiseleva O. I. "Optimizatsiia vyboru tekhnolohii budivnytstva yak zasobu pidvyshchennia konkurentospromozhnosti budivelnykh pidpriemstv." Teoretichni i prykladni pytannia ekonomiky: zb. nauk. pr. vydavnycho-poligrafichnyi tsentr "Kyivskiy universytet", 2008, Iss. 16, pp. 36-46.
21. Kravets V. O., Shevtsova V. V., Savchenko A. V. "Analiz metodiv pobudovy funktsii prynalezhnosti pry obrobtsti ekspertnykh znan." Visnyk NTU «KhPI». Serii: Tekhnika ta elektrofizyka vysokykh napruh, no.52 (958), 2012..

УДК 697.33

Логико-вероятностная оценка рисков аварий на трубопроводах тепловых сетей

Г. С. Ратушняк¹, М. В. Свідеревич²

¹к.т.н., проф. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, ratusnakg@gmail.com

²асп. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, maryna.bt09@i.ua

Аннотация. Для многофакторного анализа влияния различных факторов на эксплуатационную надёжность тепловых сетей необходимо применять теорию нечёткой логики и теории вероятностей. Методика логико-вероятностной оценки рисков аварий позволяет выполнять выбор решения по повышению эффективности систем теплоснабжения и внедрением новейших энергосберегающих технологий при их реконструкции. По результатам анализа экспертных оценок возникновения опасных ситуаций на трубопроводной части системы теплоснабжения разработана обобщённая схема развития возможной аварии с учётом факторов, влияющих на надёжность системы в целом. Получено значение нечёткой вероятности возникновения аварийной ситуации на трубопроводах тепловых сетей $P^* = (0,178; 0,657; 0,304; 0,400)$. Оценка дерева отказов позволяет определить появление события, которое может привести к нежелательному нарушению работы системы теплоснабжения. Экспериментальные данные наблюдения за изменениями исходного показателя (характеристик тепловой сети) при вариации факторов влияния по разработанной методике даёт возможность уточнять обоснования принятия решений при управлении надёжностью системы централизованного теплоснабжения с учётом количественных и качественных параметров объекта.

Ключевые слова: надёжность тепловых сетей, нечёткая логика, теория вероятностей, дерево отказов, схема развития аварии.

UDC 697.33

Logical-Probabilistic Assessment of the Risks of Accidents on the Pipelines of Heating Networks

G. Ratushnyak¹, M. Sviderevych²

¹Ph.D, professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, ratusnakg@gmail.com

²Post-graduate student. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, maryna.bt09@i.ua

Abstract. For multi-factor analysis of the influence of various factors on the operational reliability of thermal networks, there is a need to apply the theory of fuzzy logic and probability theory. The methodology of logical-probabilistic accident risk assessment allows making choices regarding the efficiency of heat supply systems and the introduction of the latest energy-saving technologies during their reconstruction. Based on the analysis of expert assessments of the emergence of hazardous situations on the pipeline part of the heat supply system, a generalized scheme for the development of a possible accident, taking into account the factors affecting the reliability of the system in general, has been developed. The value of the fuzzy probability of emergency occurrence on the pipelines of heat networks $P^* = (0,178; 0,657; 0,304; 0,400)$ was obtained. The evaluation of the bounce tree allows determining the occurrence of an event that can lead to an unwanted violation of the heat supply system. Experimental data on the monitoring of changes in the initial indicator (characteristics of the thermal network) in the variation of the factors of influence on the developed method makes it possible to specify the justification of decision-making in the management of the reliability of the district heating system, taking into account the quantitative and qualitative parameters of the object.

Key words: reliability of heating networks, fuzzy logic, probability theory, tree of failures, scheme of development of an accident.

Надійшла до редакції / Received 12.12.2017

УДК 697.325

Экспериментальные исследования сжигания биотоплива в кипящем слое

А. Ф. Редько¹, И. А. Редько², Ю. А. Пивненко³

¹д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²к.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, germes_s2006@ukr.net, 0000-0002-9863-4487

³инженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВИС», г. Вишневое, Украина, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований показателей потерь теплоты от механического недожога различных видов древесного топлива в топках кипящего слоя. Показано влияние температуры слоя и коэффициента избытка воздуха на величину механического недожога, установлено значительное повышение содержания горючих компонентов в уносе при температуре слоя ниже 750 °С, полнота сгорания топлива возрастает при температуре кипящего слоя выше 800 °С. Определены оптимальные значения коэффициента избытка воздуха (1,4...1,6), обеспечивающие минимальных унос топлива из объёма топки котла, а также значения числа псевдооживления для различных режимов работы топки. Приведены результаты определения скорости выгорания древесных отходов (щепы, опилки) и гранулированного древесного топлива (пеллеты) в режиме отсутствия теплосъёма. Отмечено, что выгорание гранулированного топлива более продолжительно чем скорость горения неподготовленных древесных отходов. При этом потери теплоты от механической неполноты сгорания для подобного топлива ниже, поскольку прессованное топливо имеет большую плотность и меньшую пористость по сравнению с опилками и щепой.

Ключевые слова: кипящий слой, топка, древесные отходы, механический недожог, потери теплоты, коэффициент избытка воздуха.

Введение. Сжигание твёрдых топлив в кипящем слое как правило сопровождается уносом из объёма топки горючих частиц и золы. Потери теплоты с механическим недожогом традиционно разделяются на потери от недожога частиц топлива, находящихся в слое и от недожога горючих в уносе. Обычно в первом случае потери невелики, практически равны нулю. Благодаря активному движению топлива в кипящем слое полнота сгорания выше по сравнению с другими способами сжигания.

В котлах с топками кипящего слоя содержание горючих в уносе удаётся минимизировать благодаря оптимизации режимных параметров сжигания. При сжигании топлив с низким выходом летучих значения потерь теплоты с механическим недожогом выше чем при сжигании топлив растительного происхождения с выходом летучих до 85%. Однако и для древесного топлива без определения оптимальных режимных параметров возможно существенное снижение эффективности сжигания топлива.

Актуальность исследования. Все большую популярность в мире приобретают топлива растительного происхождения [1, 2], такие как отходы лесоперерабатывающей и деревообрабатывающей промышленности, а также сельскохозяйственной промышленности.

Эффективным методом утилизации растительных отходов является их сжигание в кипящем слое. Данный метод считается одним из наиболее предпочтительных, поскольку топки кипящего слоя менее требовательны к качеству топлива и лучше приспособлены к его ступенчатому сжиганию, необходимому для снижения выбросов оксидов азота.

Главной проблемой, с которой приходится сталкиваться при сжигании древесного топлива в кипящем слое, является отсутствие рекомендаций по организации процессов горения. Необходимо определение режимных параметров, которые обеспечат стабильное горение, оживление топлива и минимизируют шлакование топки при максимальных показателях эффективности сжигания. На практике данные проблемы, как правило, приходится решать при пуско-наладке котельных установок [3, 4]. Неоднородный фракционный состав и переменная влажность топлива только усложняют процесс сжигания.

Основные исследования по определению потерь теплоты от механического недожога с уносом в топках кипящего слоя проводились для угольного топлива [5, 6].

В работе [7] достаточно подробно освещены проблемы сжигания биотоплива в кипящем слое и механизмы их решения. Однако, отсутствуют

рекомендации по оптимальным режимным параметрам сжигания таких топлив. В свою очередь в работе [8] приведены теоретические исследования котлов на биомассе методом эксергетического анализа

Авторы в работе [9] проводят анализ и оценку перспектив использования топлив растительного происхождения в энергетике. Отмечается возможность существенного снижения выбросов NO_x и CO_2 .

Работа [10] посвящена изучению явления агломерации шлака в топках котлов при сжигании древесного топлива и методам её предотвращения.

В [11] исследовалось совместное сжигание сельскохозяйственных отходов и древесины. Оценивался риск возникновения высокотемпературной коррозии и методы её предотвращения. Предложена концепция сжигания биотоплива в кипящем слое с температурой ниже 750°C .

Работа [12] посвящена исследованиям конструктивных особенностей топок кипящего слоя для сжигания биотоплива. Отмечено, что оптимальным конструктивным решением является выполнение топки конусообразной формы.

В работе [13] проводились эксперименты на установке тепловой мощностью $0,2\text{ МВт}$. Исследовались методы повышения эффективности сжигания крупных частиц топлива и интенсификации теплообмена.

Математическая модель сжигания биомассы рассмотрена в [14]. Приведены результаты расчётов и экспериментальных исследований когенерационной установки на биомассе. Проведена оптимизация параметров установки.

Также перспективным методом внедрения биотоплива в энергетику является совместное сжигание биомассы и угля [15].

Математическая модель определения механического недожога при сжигании биомассы в кипящем слое представлена в [16]. Однако, недостаточно исследовано влияние режимных параметров на величину уноса.

Приведённый выше анализ свидетельствует о перспективности данного направления исследований и определяет недостаточный объём данных о механизме уноса несгоревшего древесного топлива.

Основная часть. Эксперименты по определению потерь теплоты от механического недожога проводились в лабораторной установке (рис. 1, 2), которая представляет собой камеру 1 размерами $200 \times 300\text{ мм}$, высотой 1000 мм . Она оснащена системой автоматической подачи топлива 2. Воздух нагнетается вентилятором ВВД-5 3. Предусмотрена воздухораспределительная колпачковая решётка 4 (рис. 3). Калориметр 5 представляет собой трубу диаметром 18 мм . Для улавливания твёрдых частиц предусмотрена двухступенчатая система очистки газов в пылеосадительной камере 6 и тканевом фильтре 7.

Для наблюдения за процессом горения предусмотрены два смотровых кварцевых стекла, установленных в нижней и верхней зоне кипящего слоя. Температура слоя измерялась термопарой типа ТХА. Пробы уноса из пылеосадительной камеры и тканевого фильтра отбирались после каждого цикла сжигания и взвешивались. Массовое содержание горючих в уносе $\Gamma_{\text{ун}}$, %, определялось путём выжигания отобранных проб в муфельной печи.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания определялись следующим образом:

$$q_4 = \left(\alpha_{\text{шл}} \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} + \alpha_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) 32660 A^p / Q_p^p, \quad (1)$$

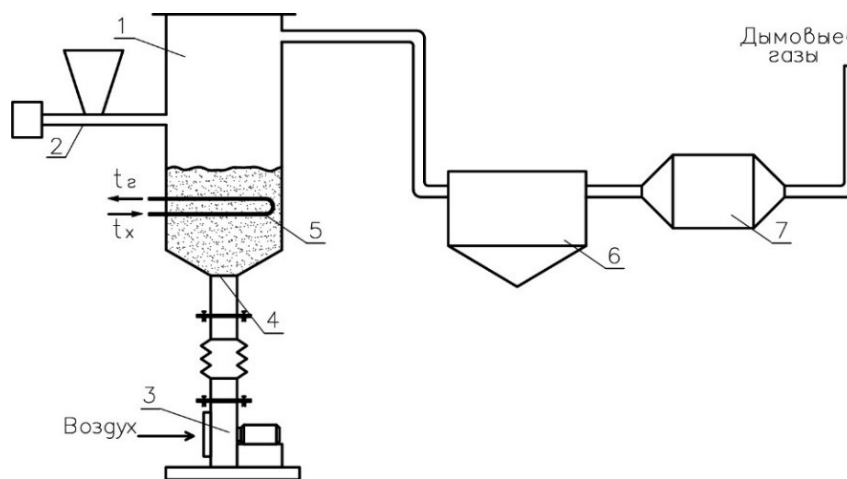


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию сжигания древесных отходов в кипящем слое



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 3. Колпачковая решётка

где $\Gamma_{шл}$, $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в шлаке и уносе соответственно, %; $\alpha_{шл}$, $\alpha_{ун}$ – доля золы в шлаке и уносе соответственно; A^p – зольность на рабочую массу топлива; Q_p^p – явная теплота на 1 кг подсушенного топлива, кДж/кг. Для топок кипящего слоя можно принимать $\alpha_{ун} \approx 1$. Тогда

$$q_4 = \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} \cdot 32660 A^p / Q_p^p \quad (2)$$

Вследствие небольших размеров экспериментальной установки унос частиц из объёма топки больше, чем в реальных котельных установках. Во время экспериментов наибольшее влияние на величину механического недожога оказывали размеры фракций топлива и коэффициент избытка воздуха. Также замечено увеличение механического недожога при невысокой температуре слоя (600...750 °С). Это обусловлено тем, что в данном диапазоне температуры наблюдается неполное выгорание топлива.

Во время розжига скорость воздуха ожигания слоя была меньше первой критической скорости, то есть число псевдоожигания W принималось меньше единицы (0,6...0,8). Для обеспе-

чения необходимого количества воздуха на горение подавался вторичный и третичный воздух. Увеличение числа псевдоожигания до $W = 1...1,2$ приводило к уносу мелких фракций из камеры сгорания.

Влажность топлива негативно влияла на процесс горения. Слишком влажное топливо (относительная влажность 30...60 %) медленно разгоралась. Достижения оптимальной температуры горения (800...850 °С) усложнялось.

Характеристики материалов кипящего слоя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов слоя		
Тип материала	Плотность, кг/м ³	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм
Песок	2600	0,3
Опилки	400	3
Щепа	600	4,7
Гранулы	1200	5,51

Ниже приведены результаты экспериментов по определению потерь теплоты вследствие механического недожога (табл. 2, рис. 4).

Как видно из графика, увеличение коэффициента избытка воздуха свыше 1,6 приводит к увеличению механического недожога. При малых значениях коэффициента избытка воздуха наблюдается существенный недожог. Наибольшая полнота сгорания достигается при $\alpha_6 = 1,4...1,6$.

Следует отметить, что число псевдоожигания для мелкофракционного топлива (опилки) не должно превышать 2,2...2,4, а для более крупного (щепа, гранулы) – 3...3,4. При больших значениях наблюдается существенный унос материала из объёма топки.

Эксперименты проводились при различных режимах подачи вторичного и третичного воздуха. Однако, изменение расхода первичного/вторичного/третичного воздуха не оказывало существенного влияния на результаты. Отсутствие подачи третичного воздуха также практически не влияло на механический недожог.

При температуре ниже 750 °С потери теплоты от механического недожога значительно возрастали (рис. 5). Мелкие фракции не успевали выгорать в объёме топки и уносились с дымовыми газами, осажаясь в пылеуловителях. Это явилось главной причиной столь большого недожога. Такое объяснение подтверждается тем, что размеры фракций в уносе составляли в основном 0,1...1 мм. При высокой температуре (800...920 °С) мелкие частицы топлива выгорают в надслоевом пространстве.

Результаты определения механического недожога

Коэффициент избытка воздуха, α_B	Древесные опилки		Щепа		Гранулы	
	$\Gamma_{ун}, \%$	$q_4, \%$	$\Gamma_{ун}, \%$	$q_4, \%$	$\Gamma_{ун}, \%$	$q_4, \%$
0,6	57,18	1,60	46,30	1,03	28,96	0,49
0,7	50,04	1,20	39,02	0,77	27,96	0,47
0,8	41,21	0,84	25,03	0,40	13,44	0,19
0,9	31,85	0,56	25,03	0,40	11,20	0,15
1,0	25,03	0,40	19,12	0,28	10,89	0,15
1,1	23,10	0,36	18,20	0,27	10,43	0,14
1,2	18,94	0,28	15,51	0,22	5,50	0,07
1,3	18,94	0,28	12,21	0,17	3,74	0,05
1,4	16,69	0,24	11,78	0,16	2,83	0,03
1,5	14,30	0,20	7,70	0,10	3,01	0,04
1,6	14,30	0,20	7,70	0,10	2,28	0,03
1,7	15,51	0,22	10,01	0,13	3,38	0,04
1,8	17,15	0,25	10,24	0,14	3,38	0,04
1,9	19,16	0,28	12,85	0,18	3,56	0,04
2,0	21,08	0,32	13,06	0,18	3,92	0,05

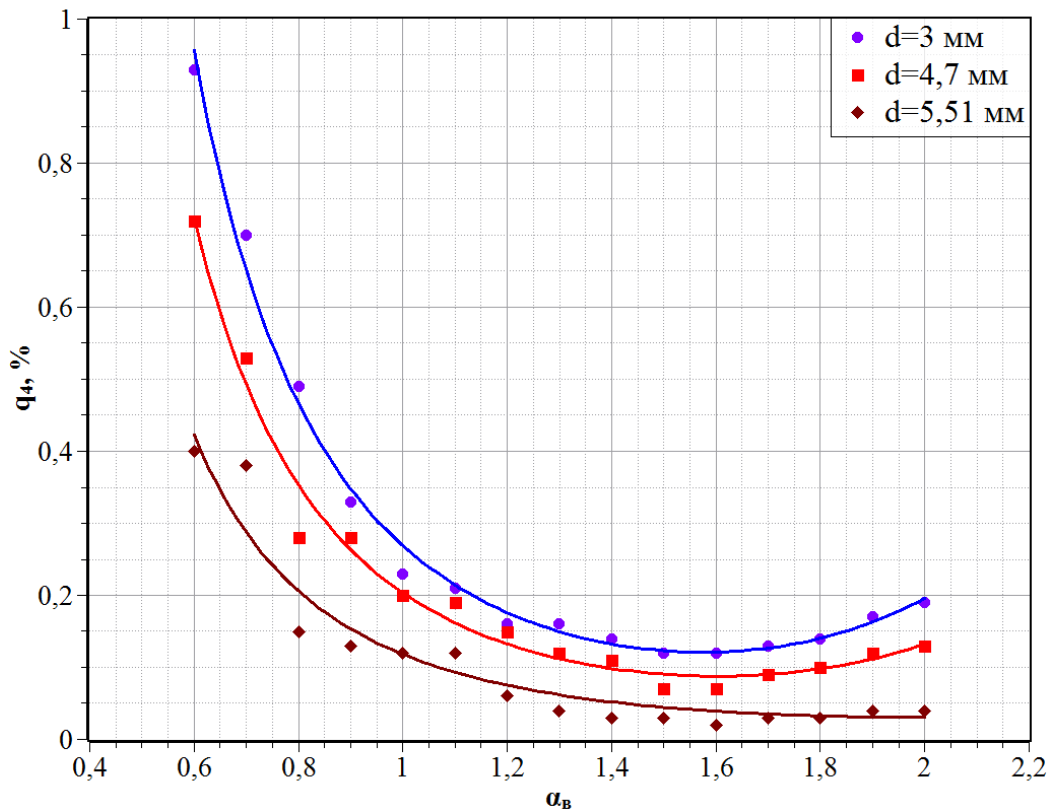


Рис. 4. Зависимость потерь теплоты из-за механического недожога от коэффициента избытка воздуха

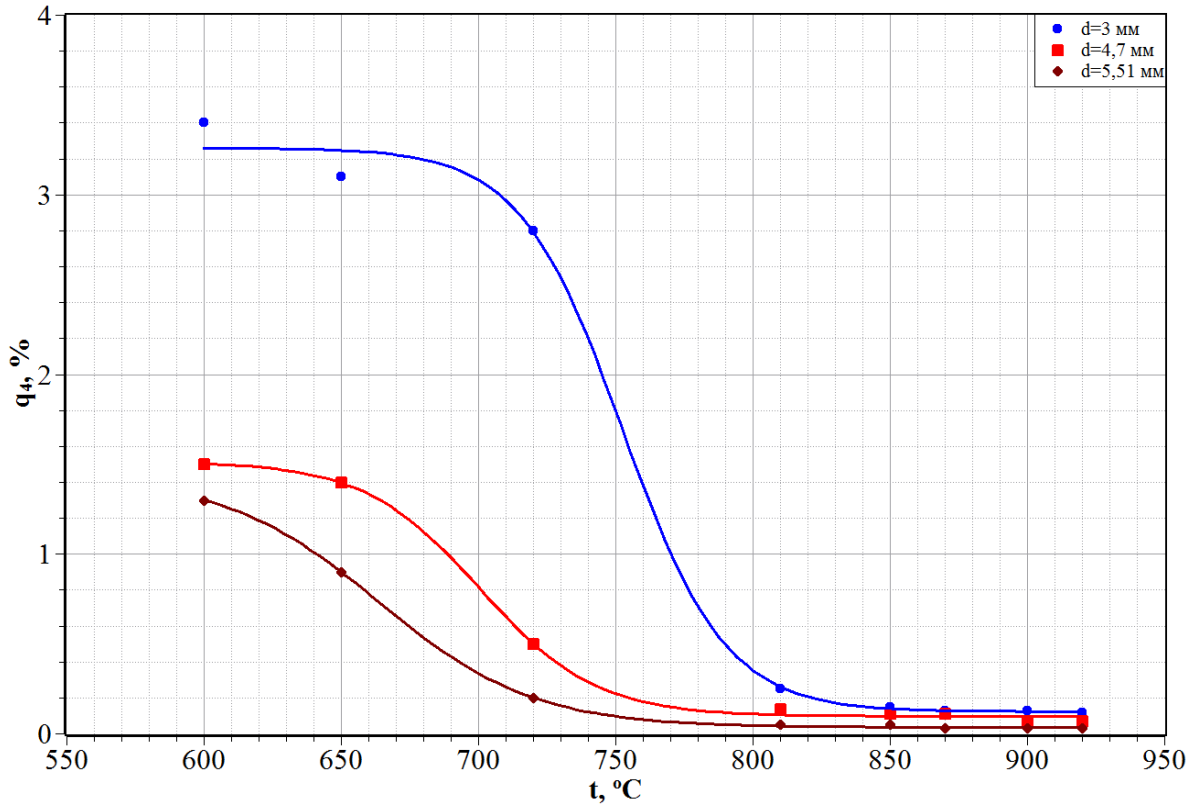


Рис. 5. Зависимость потерь теплоты из-за механического недожога от температуры слоя

Регулирование температуры кипящего слоя осуществлялось за счёт изменения расхода теплоносителя в калориметре. По результатам экспериментов построен график зависимости потерь теплоты из-за механического недожога (рис. 5) от температуры при $\alpha_6 = 1,4 \dots 1,6$.

В результате обобщения экспериментальных данных получена зависимость потерь теплоты из-за механического недожога от коэффициента избытка воздуха для древесных отходов с размером фракций от 3 до 6 мм и для температуры слоя 800...850 °С:

$$q_4 = a \cdot \alpha_6^{-2,5} + b \cdot \alpha_6^6, \quad (3)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от среднего эквивалентного диаметра частиц топлива:

$$a = 0,252 + 0,040d - 0,012d^2, \quad (4)$$

$$b = 0,00067 + 0,0013d - 0,00025d^2. \quad (5)$$

В [17] предлагается рассчитывать потери теплоты от механического недожога с учётом полидисперсности топлива. Формула справедлива для температуры кипящего слоя 750...950 °С, скорости оживления 2,9...4,3 м/с и

плотности инертного материала 1800 кг/м³:

$$q_4 = k_1 k_2 k_3 k_4 \sum_1^n [q_{fp}^i (1 - \Delta q_i) \Phi_{fp}^i / 100], \quad (6)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, зависящие от выхода летучих на беззольное состояние топлива, высоты слоя, крупности инертного материала, скорости псевдоожижения соответственно; q_{fp}^i – механический недожог данной фракции, %; Φ_{fp}^i – содержание данной фракции в топливе, %; n – количество узких фракций в топливе.

Однако, данную формулу использовать невозможно в случае сжигания древесных отходов. Скорость оживления слоя с содержанием в нём древесного топлива значительно меньше скорости оживления в эксперименте автора. Кроме того, размеры фракций инертного материала, который был использован в эксперименте по сжиганию древесных отходов, значительно меньше тех, которые применялись автором. В связи с этим определение ряда коэффициентов в данной формуле не представляется возможным.

Как видно из приведённых выше данных, потери теплоты от механической неполноты сгорания в устоявшемся режиме незначительны. Для

дальнейшего снижения потерь на практике применяют системы возврата уноса и применение особых конструктивных решений топочного объёма (таких как исполнение топки в форме конуса, установка отбойных решёток и др.).

Важным параметром, влияющим на режимы работы котла с топкой кипящего слоя, является скорость выгорания топлива. На продолжительность горения влияют различные факторы, такие как: влажность топлива, температура горения, зольность, расход дутьевого воздуха, и др.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований выгорания древесного топлива (гранулы, опилки, щепа) в кипящем слое (рис. 6). Показан рост температуры слоя в зависимости от времени сжигания.

Масса топлива в каждом цикле сжигания была одинаковой и составляла 3,8 кг. Как видно, скорость выгорания древесных опилок наибольшая среди предложенных материалов. Очевидно, причиной этому стала низкая плотность опилок. В целом время горения для всех видов топлива составляла 300...500 с. Наибольшее время розжига наблюдалось в случае сжигания древесных гранул, что также можно пояснить плотностью материала, которая значительно выше плотности щепы и опилок.

В [18] приведены результаты экспериментов по сжиганию топливных гранул из различных видов отходов растительного происхождения. Время сжигания в экспериментах авторов существенно меньше, чем в приведённых нами данных. Однако, стоит отметить, что в экспериментах по сжиганию агропеллет применялись дру-

гие режимы. Температура кипящего слоя достигала 900 °С и выше, что ускорило горение.

Кроме того, авторы [18] сжигали топливо подавая его на разогретый слоеобразующий материал (золу), тогда как в нашем эксперименте процесс горения начинался с розжига при температуре окружающего воздуха, что позволило более точно определить продолжительность розжига для каждого вида топлива.

Динамика выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника исследовалась в [19]. Топливо подавалось в предварительно разогретый до 900 °С реактор кипящего слоя в количестве 0,1 г. Инертный материал (зола) подавался в количестве 1 г. Время выгорания образцов составляло 24...60 с. Эти данные подтверждены теоретическими расчётами [20].

Как видно, при более высокой температуре кипящего слоя скорость выгорания существенно выше чем при низкотемпературном сжигании. Длительное горение, как показал эксперимент, приводит к повышению потерь теплоты от механического недожога. Однако, существуют способы снижения этих потерь. Одним из них является конструктивная оптимизация топки котла. Как отмечено в [11], низкотемпературное сжигание (около 700 °С) снижает износ котельного агрегата. Преимуществом длительного горения также является снижение износа вспомогательного оборудования, например, системы подачи топлива, поскольку скорость подачи топлива при низкотемпературном сжигании ниже чем при высокотемпературном.

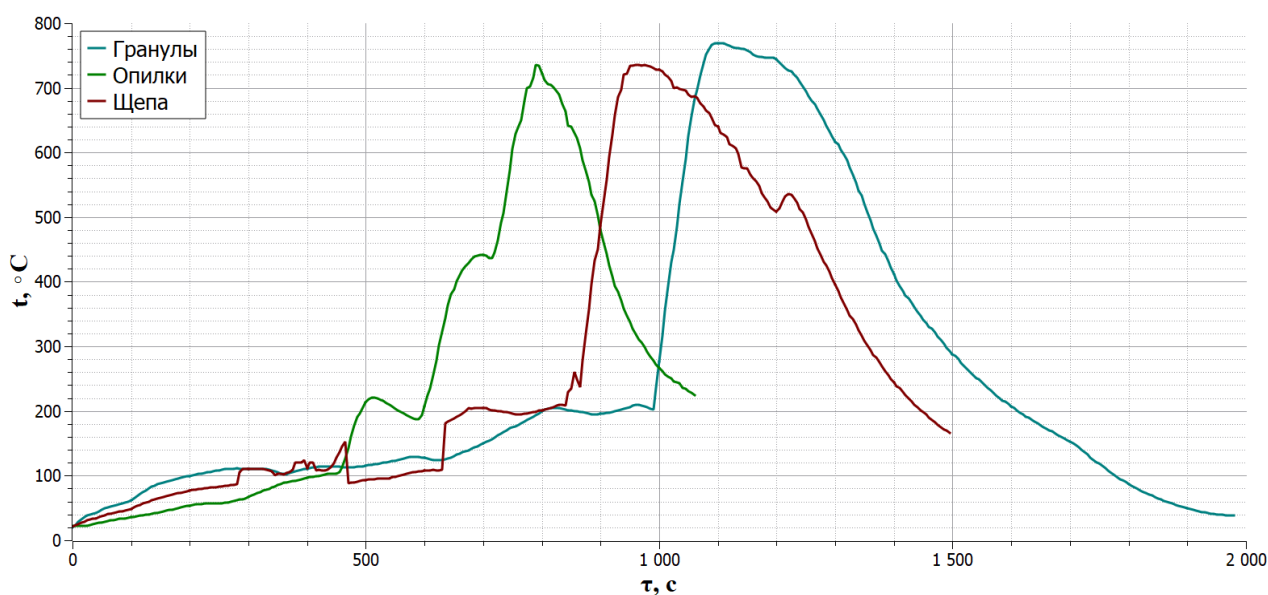


Рис. 6. Продолжительность горения различных видов древесного топлива в кипящем слое

Выводы. В результате проведённых экспериментов на лабораторной установке по исследованию сжигания древесных отходов в кипящем слое установлено влияние коэффициента избытка воздуха и температуры слоя на величину потерь теплоты от механического недожога топлива. Проведены эксперименты, позволяющие оценить продолжительность горения древесного топлива различной плотности. Топливо низкой плотности разжигается и горит быстрее более плотного топлива. Период розжига щепы был короче, чем у гранул, однако время горения этих двух видов топлива существенно не отличаются. Определены параметры, обеспечивающие минимальный механический недожог. Для

достижения максимальной эффективности сжигания топлива коэффициент избытка воздуха должен составлять 1,4...1,6, температура слоя – 800...920 °С.

Перспективы дальнейших исследований.

Полученные результаты показали возможности снижения уноса топлива в атмосферу за счёт изменения режимных параметров котельного агрегата. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение низкотемпературного сжигания (до 750 °С) твёрдого топлива. Также следует уделить внимание конструктивной оптимизации топочных устройств для сжигания топлив растительного происхождения.

Литература

1. Карапетов А. Э. Сжигание биотоплив в топках кипящего слоя / Карапетов А. Э. // Академия энергетики. – 2016. – №2 (70). – с. 40-49.
2. Варес В. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосар. – Таллин: Издательство Таллиннского технического университета, 2005. – 183 с.
3. Шемякин В. Н. Опыт практического внедрения технологии кипящего слоя в промышленной и коммунальной энергетике / В. Н. Шемякин, А. Э. Карапетов, С. В. Крылов // Труды ЦКТИ. – 2009. – №298. – с. 57-58.
4. Шемякин В. Н. Внедрение технологии сжигания в кипящем слое как один из путей решения внедрения местных низкосортных топлив в энергетику страны / В. Н. Шемякин, А. Э. Карапетов // Новости теплоснабжения. – 2009. – №9 (85). – с. 20-23.
5. Баскаков А. П. Котлы и топки с кипящим слоем. / А. П. Баскаков, В. В. Манцев, И. В. Располов. – Москва: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
6. Пузырев Е. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дисс. ... докт. техн. наук: 01.04.14: защит. 14.05.2004 / Пузырев Евгений Михайлович; Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова. – Барнаул, 2003. – 315 с.
7. Khan A.A. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies / A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, H. Spliethoff // Fuel Processing Technology. – 2009. – №1 (90). – p. 21-50.
8. Li C. Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods / C. Li, C. Gillum, K. Toupin, B. Donaldson // Energy Conversion and Management. – 2015. – № 103. – p. 665-673.
9. Saidur R. A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – №5 (15). – p. 2262-2289.
10. Davidsson K.O. Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler / K. O. Davidsson, L.-E. Åmand, B.-M. Steenari, A.-L. Elled, D. Eskilsson, B. Leckner // Chemical Engineering Science. – 2008. – №21 (63). – p. 5314-5329.
11. Silvenoinen J. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler / J. Silvenoinen, M. Hedman // Fuel Processing Technology. – 2013. – №105. – p. 11-19.
12. Sirisomboon K. Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor / K. Sirisomboon, V. I Kuprianov, P. Arromdee // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2011. – № 3 (49). – p. 270-277.
13. Sun P. Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed / P. Sun, S. Hui, Z. Gao, Q. Zhou, H. Tan, Q. Zhao, T. Xu // Applied Thermal Engineering. – 2013. – №2 (52). – p. 284-292.
14. Strzalka R. Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion / R. Strzalka, T. G. Erhart, U. Eicker // Applied Thermal Engineering. – 2013. – № 50 (2). – p. 1418-1426.
15. Sahu S. G. Coal-biomass co-combustion: An overview // S.G. Sahu, N. Chakraborty, P. Sarkar // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 39. – p. 575-586.
16. Литун Д. С. Расчет уноса золы и потерь тепла с механическим недожогом в кипящем слое при сжигании биомассы / Д. С. Литун, Г. А. Рябов // Известия российской академии наук. Энергетика. – 2015. – №5. – с. 90-102.
17. Павлов Ю. Г. Исследование природы механического недожога в топках с кипящим слоем и разработка путей увеличения их экономичности: дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 1987.
18. Исьемин Р. Л. Исследование сжигания агропеллет в кипящем слое / Р. Л. Исьемин, С. Н. Кузьмин, В. В. Кошнягин, А. В. Михалев, А. Т. Зорин, А. П. Прокопчик // Вопросы современной науки и практики. – 2008. – №2 (12). – с. 20-24.

19. Карп И. Н. Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое / И. Н. Карп, А. Ю. Провалов, К. Е. Пьяных, А. С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №3. – с. 9-13.

20. Карп И. Н. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы / И. Н. Карп, В. В. Колесник, В. Н. Орлик, К. Е. Пьяных, А. С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №5. – с.14-20.

References

1. Karapetov A. E. "Szhiganiye biotopliv v topkakh kipiashchego sloia." *Akademiia energetiki*, no.2 (70), 2016, pp. 40-49.

2. Vares V., Kask Yu., Muyste P., Pikhu T., Soosar S. *Spravochnik potrebitelia biotopliva*. Izdatelstvo Tallinnskogo tekhnicheskogo universiteta, 2005.

3. Shemiakin V. N., Karapetov A. E., Krylov S.V. "Opyt prakticheskogo vnedreniia tekhnologii kipiashchego sloia v promyshlennoi i kommunalnoi energetike." *Trudy TsKTI*, no. 298, 2009, pp. 57-58.

4. Shemiakin V. N., Karapetov A. E. "Vnedreniye tekhnologii szhiganiya v kipyashchem sloye kak odin iz putey resheniya vnedreniya mestnykh nizkosortnykh topliv v energetiku strany." *Novosti teplosnabzheniya*, no. 9(85), 2009, pp. 20-23.

5. Baskakov A. P., Mantsev V. V., Raspolov I. V. *Kotly i topki s kipyashchim sloyem*. Energoatomizlat, 1996.

6. Puzyrev E. M. *Issledovaniye topochnykh protsessov i razrabotka kotlov dlya nizkotemperaturnogo szhiganiya goryuchikh otkhodov i mestnykh topliv*. Diss. Polzunov Altai State Technical University, 2003.

7. Khan A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H. "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies." *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 1, 2009, pp. 21-50.

8. Li C., Gillum C., Toupin K., Donaldson B. "Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods." *Energy Conversion and Management*, vol. 103, 2015, pp. 665-673.

9. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. "A review on biomass as a fuel for boilers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, 2011, pp. 2262-2289.

10. Davidsson K.O., Åmand L.-E., Steenari B.-M., Elled A.-L., Eskilsson D., Leckner B. "Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler." *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 21, 2008, pp. 5314-5329.

11. Silvenoinen J., Hedman M. "Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler." *Fuel Processing Technology*, vol. 105, 2013, pp. 11-19.

12. Sirisomboon K., Kuprianov V. I., Arromdee P. "Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 49, no. 3, 2010, pp. 270-277.

13. Sun P., Hui S., Gao Z., Zhou Q., Tan H., Zhao Q., Xu T. "Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed." *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, no. 2, 2013, pp. 284-292.

14. Strzalka R., Erhart T. G., Eicker U. "Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion." *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 2, 2013, pp. 1418-1426.

15. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. "Coal-biomass co-combustion: An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, 2014, pp. 575-586.

16. Litun D. S., Riabov G. A. "Raschet unosa zoly i poter tepla s mekhanicheskim nedozhogom v kipyashchem sloye pri szhiganiu biomassy." *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Energetika*, no. 5, 2015, pp. 90-102.

17. Pavlov Yu. G. *Issledovaniye prirody mekhanicheskogo nedozhoga topliva v topkakh s kipyashchim sloyem i razrabotka putey uvelicheniya ikh ekonomichnosti*. Diss. Moscow, 1987.

18. Isemin R.L., Kuzmin S.N., Koniakhin V.V., Mikhalev A.V., Zorin A.T., Prokopchik A.P. "Issledovaniye szhiganiya agropellet v kipyashchem sloye." *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*, no. 2(12), 2008, pp. 20-24.

19. Карп И. Н., Провалов А. Ю., Пьяных К. Е., Юдин А. С. "Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое." *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, no 3, 2010, pp. 9-13.

20. Карп И. Н., Колесник В. В., Орлик В. Н., Пьяных К. Е., Юдин А. С. "Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы." *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, no 5, 2010, pp. 14-20.

УДК 697.325

Експериментальні дослідження спалювання біопалива в киплячому шарі

О. Ф. Редько¹, І. О. Редько², Ю. О. Півненко³

¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, redko.af@gmail.com,

²к.т.н., доц. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, germes_s2006@ukr.net

³інженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВІС», м. Вишневе, Україна, pivnenko.yura@gmail.com

Анотація. Представлені результати експериментальних досліджень показників втрат теплоти через механічний недопал різних видів деревного палива в топках киплячого шару. Показаний вплив температури шару та коефіцієнту надлишку повітря на величину механічного недопалу. Встановлено значне підвищення вмісту горючих складових у виносі за температури шару нижче ніж 750 °С. Повнота згоряння зростає за температури киплячого шару вище ніж 800 °С. Визначені оптимальні значення коефіцієнта надлишку повітря (1,4...1,6), що забезпечують мінімальний винос палива з об'єму топки котла, а також значення числа псевдозрідження для різних режимів роботи топки. Наведені результати визначення швидкості вигорання деревних відходів (щепи, тирса) і гранульованого деревного палива (пелети) в режимі відсутності відбору теплоти. Відзначено, що вигорання гранульованого палива більш тривале ніж швидкість горіння непідготовлених деревних відходів. При цьому втрати теплоти від механічної неповноти згоряння для подібного палива нижчі, оскільки пресоване паливо має більшу густину порівняно з щепою і щепою.

Ключові слова: киплячий шар, топка, деревні відходи, механічний недопал, втрати теплоти, коефіцієнт надлишку повітря.

UDC 697.325

Experimental Studies of Combustion of Biofuel in a Fluidized Bed

O. Redko¹, I. Redko², Yu. Pivnenko³

¹Sc.D, professor, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, redko.af@gmail.com,

²PhD, associate professor, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, germes_s2006@ukr.net

³Engineer, Ltd "PROMOLUKS SERVIS", Vyshneve, Ukraine pivnenko.yura@gmail.com

Abstract. Results of experimental studies of heat losses due to mechanical underburning of various types of wood fuel in the furnaces of the fluidized bed are presented. Influence of the bed temperature and the air excess factor on the magnitude of mechanical underburning is shown. A significant increase in the content of combustible components in the entrainment is observed at the temperature below 750 °C, the completeness of combustion of the fuel increases at the temperature of the boiling layer above 800 °C. The optimum values of the excess air factor (1.4 ... 1.6) are determined, which ensure minimum fuel drift from the boiler furnace volume, as well as the fluidization number for various operating modes of the furnace. The results of determining the burning rate of wood waste (wood chips, sawdust) and granulated wood fuel (pellets) at the absence of heat removal are given. It is noted that the burning out of granulated fuel is more prolonged than the burning rate of unprepared wood waste, while the loss of heat due to mechanical incompleteness of combustion for such fuel is lower, since the compressed fuel has a higher density and less sail than sawdust and chips.

Keywords: fluidized bed, furnace, waste wood, mechanical underburning, heat loss, the air excess coefficient.

Надійшла до редакції / Received 11.12.2017.

Дудніков Анатолій Пантелійович (1938-2016)



У 1958 році закінчив Київський будівельний технікум, служив у армії. У 1966 році закінчив санітарно-технічний факультет Київського інженерно – будівельного інституту. Працював виконробом на будівництві.

З 1968 року працював у державному науково-дослідному інституті санітарної техніки, де пройшов шлях від рядового інженера до заступника директора. З 1993 р. – директор Сертифікаційного випробувального центру опалювального обладнання. У 2007-2016 рр. очолював Державну екзаменаційну комісію кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури.

Відзначений чотирма урядовими нагородами, найвищими дипломами і медалями ВДНГ України і СРСР.

Кафедра теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури тісно співробітничала з А.П. Дудніковим. Він запам'ятався як світла, чуйна людина, завжди готова прийти на допомогу. Він був високопрофесійним, наполегливим та мав великий авторитет. На знак великої

пошани на честь річниці кончини у 2017 р. за участі керівництва Київського національного університету будівництва і архітектури й факультету інженерних систем та екології на кафедрі відкрита меморіальна дошка А. П. Дуднікова.



Пригадує старший син Анатолія Пантелійовича Андрій Анатолійович Дудніков, Заслужений будівельник України, дійсний член Академії будівництва України, керуючий трестом ВАТ «Київспецбуд».



Народився Анатолій Пантелійович на хуторі Широкому Ростовської області, де жили сім'ї переселенців з України. Він завжди любив Україну, її мову та пісні. Сім'я була багатодітною, була одна прийомна дитина, яка прибилася до сім'ї. У дитини на шиї була клейонка з написом "бурса". Так і назвали дитину, яка у майбутньому змінила долю батька, – Володимир Бурса. Володимир після служби в армії та демобілізації в чині капітана переїхав до Києва та очолив МПТУ (Міське ПТУ). Після цього до Києва переїхав і Анатолій Пантелійович, де почав навчання в Київському інженерно-будівельному інституті.

Під час навчання був командиром будівельного загону. Має грамоту Верховної Ради Казахстану за освоєння цілини.

Своє життя він присвятив науці. Кандидатську дисертацію з газопостачання захистив у Ленінграді під керівництвом видатного вченого в галузі газопостачання, професора, засновника ленінградської наукової школи в цій галузі Миколи Лукича Стаскевича.

Батько мав величезний організаторський хист. Він очолив лабораторію в Київському науково-дослідному інституті санітарної техніки, а після розпаду СРСР організував сертифікаційний випробувальний центр опалювального обладнання. Центр співпрацював з багатьма країнами Європи.

Мав двох дітей, Андрія та Максима, двох онуків, Євгена та Олексія, які працюють за тією ж спеціальністю. Також мав онучку Марію. Один з онуків – Олексій Дудніков – аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції.

Основна риса характеру батька – доброта. Якби треба було охарактеризувати його одним словом, то це – добрий. Він був гарним організатором, з усіма знаходив спільну мову, дуже

компанійський. Близько товаришував з Анатолієм Михайловичем Тугаєм (ректором Київського національного університету будівництва і архітектури), Андрієм Яковичем Ткачуком і Євгеном Сергійовичем Зайченком (професорами кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури), та багатьма іншими.

Пригадує друг Анатолія Пантелійовича Василь Сергійович Пшеничнюк, Заслужений будівельник України, директор ТОВ «Київміськсантехмонтаж».



Анатолій Пантелійович закінчив Київський інженерно-будівельний інститут разом з майбутнім ректором Анатолієм Михайловичем Тугаєм. Я був з ним у будівельному загоні в радгоспі Сосновському Кустанайської області. Анатолій Пантелійович був командиром. Загін склався з 40 студентів. Він був талановитим, дисциплінованим. Його любили і студенти і викладачі за чесність, принциповість. У будь-яку хвилину міг прийти на допомогу. У нього було багато друзів на факультеті.

У Ленінграді захистив кандидатську дисертацію на металургійному комбінаті.

Після Юрія Олександровича Ветрова Анатолій Михайлович Тугай став ректором Київського інженерно-будівельного інституту і запросив Анатолія Пантелійовича на роботу до інституту головою Державної екзаменаційної комісії щодо захисту дипломних проектів. Анатолій Пантелійович брав активну участь у роботі санітарно-технічного факультету, який згодом

став факультетом інженерних систем та екології. Був директором сертифікаційного центру України, що сертифікував котли, плити, водонагрівачі тощо.

Я дуже цінував Анатолія Пантелійовича за доброту, порядність, за те ставлення, яке він проявляв. Він допоміг встановити на роботі котли, надавав співробітників для консультацій. Був рідною людиною, на нього можна було покластися в будь-який момент. Анатолій Пантелійович заходив часто до мене або телефонував, щоб домовитися про зустріч. Я теж часто бував у нього вдома. Він був чарівним, добрим, чуйним. У нього чарівна дружина Ніна, весела, цікава, добра. З нею зараз часто спілкуюся телефоном, за можливістю підтримую.

На дачі в них бував неодноразово. Він пока-

зував, що зробив своєю працею на ділянці. Дерева посадив, будинок побудував. Був грамотним, ерудованим, міг дати поради.

Завдяки Анатолію Пантелійовичу я бував часто в західноєвропейській країнах, де нас поважали і ставилися до нас як до спеціалістів високого рівня.

З Анатолієм Пантелійовичем було легко. Він мав великі можливості. Це була дивовижна людина по доброті та порядності. Був суворим із співробітниками, але ніколи не ображав. Був людиною слова. Завжди намагався допомогти.

Померли Анатолій Пантелійович та Анатолій Михайлович практично в один день. Жалкую дуже, що їх немає з нами. Таких близьких людей у мене зараз нема. За одну добу я ніби втратив двох рідних братів.

Наукове видання

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 23

Визнаний ВАК України як наукове фахове видання України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України № 515 від 16.05.2016 р.)

Збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» представлений на сайті <http://www.nbuv.gov.ua> національної бібліотеки НАН України ім. В.І. Вернадського та на сайті КНУБА science.knuba.edu.ua (<http://science.knuba.edu.ua/index.php?id=43>).

Підписано до друку 26.12.2017. Формат 60×84 1/8
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 6,75. обл. вид. арк. 7,25.
Тираж 1000 прим. Замовлення № 161117

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36-а т: (044) 360-22-66, www.yuston.com.ua
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 797 від 09.09.2015 р.