

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ



МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ДОВКІЛЛЯ, РЕСУРСИ, ЕНЕРГІЯ»
ERE-2020

25-26
ЛИСТОПАДА

Випуск 34

Київ 2020



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 34

Kyiv 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

заснований у 2001 році

ВИПУСК 34

Київ 2020

УДК 697

ISSN 2409-2606

B29

Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 34 / відповідальний редактор В. Б. Довгалюк. – Київ: КНУБА, 2020. – 63 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 В. Б. Довгалюк (відповідальний редактор); докт. техн. наук, професор В. П. Корбут (заступник відповідального редактора); канд. техн. наук, доцент В. О. Мілейковський (відповідальний секретар); докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України В. М. Міхайленко; докт. техн. наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України О. Л. Підгорний; докт. техн. наук, професор О. В. Приймак; канд. техн. наук, професор В. В. Трофімович; докт. техн. наук, професор Б. Рашуо (Сербія); доктор наук, професор А. Рогожа (Литва); докт. техн. наук, професор Г. Собчук (Польща); докт. техн. наук, професор М. Улевіч (Польща); доктор інженер, доцент А. Ліс (Польща); доктор інженер, доцент А. Уйма (Польща); докт. техн. наук, професор О. Токмаджян (Вірменія); докт. техн. наук, професор А. Маргарян (Вірменія); докт. техн. наук, доцент В. Токмаджян (Вірменія); доктор Г. Глінцерер (Австрія).

Рекомендовано до випуску Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури 10 вересня 2020 року, протокол № 33.

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 та читачів.....</i>	<i>5</i>
<i>В. Б. Довгалюк, Ю. В. Човнюк, М. О. Шишина, А. С. Москвітіна Функціональний аналіз теплопровідності та в'язкості квазітвердих капілярно-пористих тіл за змінних параметрів повітряного середовища при музейному зберіганні.....</i>	<i>7</i>
<i>В.Б. Довгалюк, Ю.В. Човнюк, В.Т. Кравчук, А.С. Москвітіна, М. О. Шишина Термодинамічний аналіз твердіння пасто- й рідиноподібних елементів музейних експонатів під впливом мікрокліматичних умов приміщення.....</i>	<i>16</i>
<i>В. Г. Наливайко, В. А. Коновалюк Розробка ефективних способів і засобів нормалізації атмосфери робочих зон кар'єрів.....</i>	<i>29</i>
<i>Ю. В. Човнюк, В. Т. Кравчук, А. С. Москвітіна, І. О. Пефтева Чисельне моделювання нестационарної течії в'язкої нестисливої рідини в плоских каналах довільної форми теплообмінних апаратів.....</i>	<i>41</i>
<i>А. О. Редько, І. О. Редько, С. В. Павловський, Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, С. О. Алфьоров Застосування абсорбційного теплового насоса в умовах наявної теплоелектроцентралі.....</i>	<i>57</i>

CONTENTS

<i>Information for the Authors and the Readers</i>	5
V. Dovhaliuk, Y. Chovniuk, M. Shyshyna, A. Moskvitina <i>Functional analysis of thermal conductivity and viscosity of quasi-solid capillary-porous bodies under varying air environment conditions during museum storage (in Ukrainian)</i>	7
V. Dovhaliuk, Y. Chovniuk, V. Kravchuk, A. Moskvitina, M. Shyshyna <i>Thermodynamic Analysis of Hardening Paste- and Liquid-Like Elements of Museum Exhibits under the Influence of Microclimatic Conditions in a Room (in Ukrainian)</i>	16
V. Nalyvaiko, V. Konovaliuk <i>Development of effective methods and means of normalizing the atmosphere of working zones of open-cast mines (in Ukrainian)</i>	29
Yu. Chovniuk, V. Kravchuk, A. Moskvitina, I. Pefteva <i>Numerical simulation of unsteady flow of a viscous incompressible liquid in flat channels of arbitrary shape of heat exchangers (in Ukrainian)</i>	41
A. Redko, I. Redko, S. Pavlovskiy, Y. Burda, Y. Pivnenko, S. Alforov <i>Application of an absorption heat pump in the conditions of an existing combined heat and power plant (in Ukrainian)</i>	57

До відома авторів та читачів

Шановні автори, рецензенти та читачі науково-технічного збірника “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”.

Продовжуємо публікацію статей за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції “Довкілля, ресурси, енергія” ERE-2020 факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

Вітаємо головного редактора збірника, завідувача кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури, професора Володимира Борисовича Довгалиюка з затвердженням рішення Спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 про присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.03 “Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання”. Бажаємо успіхів у подальшій роботі, зокрема, над дуже актуальною для всього світу, складною та міждисциплінарною тематикою формування мікроклімату задля збереження музейних цінностей з урахуванням змінного режиму експлуатації приміщень. Ці предмети, архітектурні елементи тощо є безцінним загальнолюдським надбанням і носіями історичної пам’яті. Наш обов’язок зберегти їх з мінімальним старінням і передати нащадкам.

Information for the Authors and the Readers

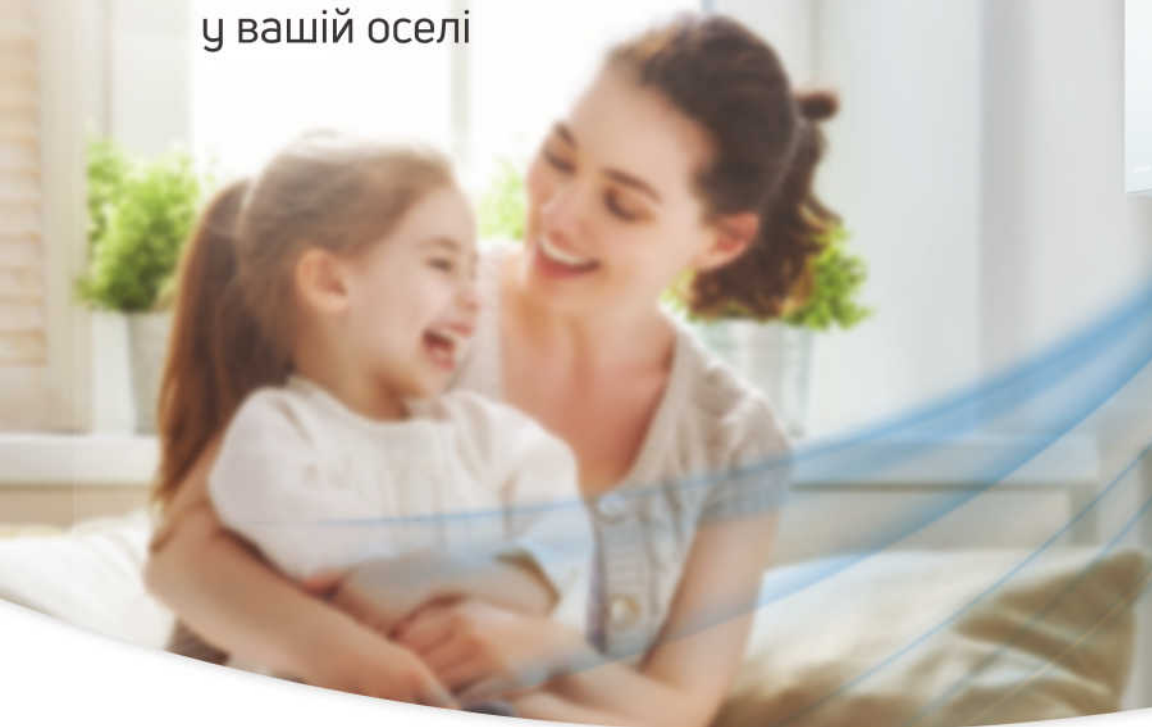
Dear authors, reviewers and readers of the Scientific and Technical Collection “Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplo hazopostachannia” (“Ventilation, Illumination and Heat and Gas Supply”).

In the issue, we continue the publication of articles on the materials of the International scientific and practical conference “Environment, Resources, Energy” ERE-2020 of Engineering Systems and Ecology Department, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Congratulations to the editor-in-chief of the collection, Head of Heat-Gas Supply and Ventilation department of Kyiv National University of Construction and Architecture, Professor Volodymyr Dovhaliuk with approval of the decision of the Specialized Academic Council D 26.056.07 on awarding the degree of Doctor of Technical Sciences. We wish success in further work, in particular, on a very relevant for the whole world, complex and interdisciplinary topics of microclimate formation in order to preserve museum values, taking into account the changing conditions of their operation. These objects, architectural elements, etc. are invaluable universal heritage and carriers of historical memory. It is our responsibility to keep them to a minimum senescence and pass them on to our descendants.

Рекуператори Blauberg **Vento Expert** —

комфорт і свіжість
у вашій оселі



Чисте повітря

Установка обладнана фільтрами грубого очищення і тонкого очищення (опція). Рекуператор забезпечує приплив чистого повітря до приміщення незалежно від рівня забрудненості за вікном. Чисте повітря – це здоров'я вашої родини.



Контроль вологості

Поєднання вбудованого датчика вологості і керамічного рекуператора дозволяє підтримувати комфортний рівень вологості в приміщенні, що дуже важливо для легкого дихання.



Тепле провітрювання

Пристрої Vento Expert обладнані керамічним рекуператором з шестигранною структурою комірки, що гарантує високу ефективність рекуперації тепла. Завдяки цьому провітрювання приміщення здійснюється теплим повітрям навіть холодної пори року, що створює максимальний комфорт для дітей та дорослих.



Зручне керування

Можливе дистанційне керування пультом. Версія пристрою Blauberg Vento Expert Plus WiFi має вбудований WiFi-модуль, що дозволяє здійснити підключення до системи «Розумний дім», легко налаштувати спільну роботу декількох пристроїв, а також керувати ними зі смартфона.



Безшумна робота

Використання високоефективного вентилятора і оптимально підібрана конструкція установки гарантують низький рівень шуму – всього 11 дБa в нічному режимі. Ніщо не потривожить ваш сон.



Енергоефективність

Споживає Vento Expert усього 5 Вт електроенергії, що в 3 рази менше, ніж вимкнений телевізор (у режимі standby). Рівень рекуперації провітрювача – до 97%.

УДК 539.3

Функціональний аналіз теплопровідності та в'язкості квазітвердих капілярно-пористих тіл за змінних параметрів повітряного середовища при музейному зберіганні

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², М. О. Шишина³, А. С. Москвітін⁴

¹д.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, ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

³асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, shyshyna.mo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9384-7662

⁴асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646

Анотація. Наведено фундаментальний аналіз теплопровідності та в'язкості квазітвердих капілярно-пористих тіл (КПТ), які є матеріалами предметів музейного зберігання. Серед іншого це – фарби на картинах, фарбовані тканини тощо. Зміна параметрів повітряного середовища спричиняє виникнення градієнту температури у КПТ. Отримана система диференціальних рівнянь у частинних похідних за часовими та просторовими координатами адекватно описує процес теплопровідності у квазітвердих КПТ та враховує анізотропію теплових параметрів КПТ, зокрема, його коефіцієнтів теплового розширення та теплопровідності. Для аналізу в'язкості квазітвердих КПТ визначено дисипативну функцію для ізотропного й анізотропного випадків. Врахування в'язкості в рівняннях руху може бути здійснене шляхом заміни тензора напружень на тензор, який додатково враховує ще й «дисипативний» тензор напружень.

Ключові слова: теплопровідність, в'язкість, квазітверде капілярно-пористе тіло, музейний експонат, дисипативна функція.

Постановка проблеми. У музейному зберіганні на території України перебуває більше 11 мільйонів експонатів. Їхня кількість постійно зростає. Більшість предметів зберігання є складними виробами, у яких поєднуються матеріали з абсолютно різними фізичними, механічними та термодинамічними властивостями. При створенні умов зберігання неможливо врахувати особливості кожного конкретного експонату. Це призводить до змін перебігу тепломасообмінних процесів у матеріалах. Особливо чутливими до змінних тепловологісних умов є матеріали, які в процесі твердіння утворюють пористі структури (наприклад, фарбові шари живопису, фарбовані тканини, тощо). Такий клас матеріалів при певних умовах можна розглядати як квазітверді КПТ.

Зміна температури навколишнього середовища супроводжується процесами теплопереносу в матеріалі. У результаті виникають деформації, що інтенсифікують старіння та деструкцію експонатів. А це означає втрату безцінного надбання людства.

Зазвичай нерівномірний нагрів твердого середовища, зокрема, квазітвердого КПТ, не супроводжується конвекцією. Перенесення теплоти здійснюється лише за рахунок механізму теплопровідності. Для коректного математи-

чного аналізу цього процесу в КПТ необхідно отримати повну систему рівнянь у частинних похідних за часовою та просторовими координатами. Вона має описувати розподіл температури в КПТ й одночасно враховувати переміщення, які виникають у тілі.

Дисипація енергії у квазітвердих КПТ обумовлена двома процесами:

1. Якщо в різних місцях таких тіл температура неоднакова, тоді в них виникають незворотні процеси теплопровідності;
2. Якщо в КПТ відбувається будь-який внутрішній рух, тоді виникають незворотні процеси, пов'язані зі скінченним значенням швидкості руху; ці процеси дисипації енергії у квазітвердих КПТ можна назвати процесами внутрішнього тертя чи в'язкості.

Оскільки швидкість макроскопічного руху в КПТ дуже мала, то дисипація енергії в тілі незначна. Такі «майже зворотні» процеси можна описувати за системою дисипативної функції (підхід Релея), котру треба визначити із урахуванням особливостей (структурних, кінематичних та ін.) КПТ.

Актуальність дослідження. Отримані в роботі результати дають можливість уточнення та вдосконалення інженерних методів розрахунку параметрів теплопровідності квазітвердих

КПТ музейних цінностей у змінних умовах внутрішнього середовища приміщень при моделюванні методами математичної фізики.

Останні дослідження та публікації.

Детально процеси теплопровідності та в'язкості твердих тіл описані в роботі [1]. Деякі специфічні особливості твердих тіл, які визначаються їхніми пластичними властивостями та призводять до структурних змін і самоорганізації на різних рівнях організації твердих тіл, описані в роботах [2, 3].

На думку авторів даного дослідження, результати зазначених робіт можуть бути використані при моделюванні процесів теплопровідності та в'язкості КПТ.

Формулювання цілей статті. Мета роботи полягає в обґрунтуванні фізико-механічних і математичних моделей для опису процесів теплопровідності та в'язкості квазітвердих тіл типу капілярно-пористих.

Рівняння теплопровідності у квазітвердих КПТ. Нерівномірне нагрівання квазітвердих КПТ не призводить до виникнення в них конвекції, як це зазвичай має місце в рідинах. Тому процес перенесення теплоти здійснюється лише теплопровідністю. Тому процеси теплопровідності в КПТ описуються більш простими рівняннями, ніж у рідинах, де вони ускладнюються конвекцією.

Рівняння теплопровідності в КПТ, як квазітвердому тілі, може бути виведене безпосередньо з закону збереження енергії. Останній виражений у вигляді «рівняння нерозривності» для теплоти. Кількість теплоти, яка поглинається за одиницю часу t , с, на одиницю об'єму КПТ з температурою T , К, дорівнює $T \partial S' / \partial t$, Вт/м³, де S' – ентропія одиниці об'єму, Дж/(м³ К). Ця величина повинна бути прирівняною до мінус $\text{div } \vec{q}$, Вт/м³, де \vec{q} – густина потоку теплоти, Вт/м². Цей потік може бути практично завжди записаний у вигляді $\vec{q} = -\kappa \nabla T$, Вт/м², тобто як пропорційний вектору градієнта температури ∇T , К/м, з коефіцієнтом пропорційності, рівним коефіцієнту теплопровідності κ , Вт/(м К). Таким чином,

$$T \frac{\partial S}{\partial t} = \text{div}(\kappa \nabla T), \text{ Вт/м}^3. \quad (1)$$

Згідно з відомою формулою [1] ентропія

$$S = S_0(T) + K \alpha u_{ii}, \text{ Дж/(м}^3 \text{ К)}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення, К⁻¹, а S_0 – ентропія КПТ на одиницю об'єму,

Дж/(м³ К), у недеформованому стані; K – питома енергія деформування конкретної речовини (КПТ), Дж/м³; u_{ii} – компоненти тензора деформації. Будемо припускати, що різниці температури, K , наявні у КПТ, досить малі. Тому можна вважати постійними такі величини, як коефіцієнт теплопровідності κ , Вт/(м К), коефіцієнт температурного розширення α , К⁻¹ тощо. Тоді формули (1) і (2) дадуть залежність

$$T \frac{\partial S_0}{\partial t} + \alpha K T \frac{\partial u_{ii}}{\partial t} = \kappa \Delta T, \text{ Вт/м}^3, \quad (3)$$

де $\Delta = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$ – оператор Лапласа.

Згідно з відомою термодинамічною формулою маємо різницю об'ємної ізобарної C_p та ізохорної C_v , Дж/(м³ К), теплоємності $C_p - C_v = K \alpha^2 T$, Дж/(м³ К). Звідси маємо $\alpha K T = (C_p - C_v) / \alpha$.

Похідну від S_0 можна записати як

$$\frac{\partial S_0}{\partial t} = \frac{\partial S_0}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \text{ Вт/(м}^3 \text{ К)},$$

де похідна $\partial S_0 / \partial T$, Дж/(м³ К²), береться при значенні $u_{ii} \equiv \text{div } \vec{u} = 0$, тобто при постійному об'ємі; а \vec{u} – вектор переміщення/деформації КПТ, м. Тоді $\partial S_0 / \partial T = C_v / T$, Дж/(м³ К²).

У результаті отримаємо рівняння теплопровідності КПТ у наступному виді:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{C_p - C_v}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} (\text{div } \vec{u}) = \kappa \Delta T, \text{ Вт/м}^3. \quad (4)$$

Щоб отримати повну систему рівнянь слід долучити рівняння, яке визначає деформацію нерівномірно нагрітого квазітвердого КПТ [1]

$$2(1 - \sigma) \nabla (\text{div } \vec{u}) - (1 - 2\sigma) \text{rot rot } \vec{u} = \frac{2\alpha(1 + \sigma)}{3} \nabla T, \text{ м}^{-1}, \quad (5)$$

де σ – коефіцієнт Пуассона КПТ.

З рівняння (5) може бути визначена деформація КПТ за довільно заданого розподілу температури T , К. Підставлення отриманого таким чином виразу для $\text{div } u$ до рівняння (4) призведе до рівняння, яке визначає розподіл температури. У ньому невідомою функцією є лише $T(x, y, z, t)$, К.

Таким чином, повна система рівнянь для КПТ, яка зв'язує переміщення u , м/с, з

температурою T , К, має вигляд

$$\begin{cases} C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{C_p - C_v}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{div} \vec{u}) = \kappa \Delta T, \text{ Вт/м}^3; \\ 2(1-\sigma) \nabla (\operatorname{div} \vec{u}) - \\ -(1-2\sigma) \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{u} = \frac{2\alpha(1+\sigma)}{3} \nabla T, \text{ м}^{-1}. \end{cases} \quad (6)$$

Розглянемо, наприклад, теплопровідність у необмеженому квазітвердому КПТ з розподілом температури, К, який задовольняє тільки одній умові: на нескінченності температура T , К, прямує до постійної границі T_0 , К, і деформація відсутня. У такому випадку рівняння (5) призводить до залежності [1]

$$\operatorname{div} \vec{u} = \frac{1+\sigma}{3(1-\sigma)} \alpha (T - T_0). \quad (7)$$

Підставляємо вираз (7) до (4). Маємо рівняння

$$\frac{(1+\sigma)C_p + 2(1-2\sigma)C_v}{3(1-\sigma)} \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T, \text{ Вт/м}^3. \quad (8)$$

Рівняння (8) відповідає простому рівнянню теплопровідності.

У найбільш загальному випадку з системи рівнянь (6) шляхом нескладних перетворень можна отримати

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} (\operatorname{rot} \vec{u}) = \nabla \left(\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma} \frac{\alpha}{C_p - C_v} \times \right. \\ \left. \times \left(\kappa \Delta T - C_v \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{2\alpha(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)} T \right), \text{ м}^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отже, за заданого закону $T(x, y, z, t)$, К, переміщення/деформації КПТ як квазітвердого тіла визначаються градієнтами величин T , К, $\partial T/\partial t$, К/с, та ΔT , К/м². За фізичним змістом ці переміщення/деформації є наслідком зазначених змін температурного поля й відносяться до так званого вихрового механічного поля [2,3]. Останнє має компоненти $\operatorname{rot} \vec{u} \neq 0$, м⁻¹, і породжує у КПТ пластичні течії хвилеподібного типу.

Рівняння типу (8) описує також розподіл температури вздовж прямого тонкого стрижня/волокна (КПТ), якщо хоча б один з його кінців не закріплений. Розподіл температури впродовж кожного з поперечних перерізів такого стрижня/волокна (КПТ) можна вважати по-

стійним. Тому температура T , К, буде функцією лише від координати x , м, уздовж його довжини та від часу t , с. Теплове розширення такого КПТ – стрижня/волокна призводить лише до зміни його довжини без зміни прямолінійної форми і без виникнення внутрішніх напружень у ньому. Тому зрозуміло, що похідна $\partial S/\partial t$, Вт/м³, у загальному рівнянні (1) повинна братися при постійному тиску p , Па. Оскільки

$$\left. \frac{\partial S}{\partial T} \right|_{p=\text{const}} = \frac{C_p}{T}, \text{ Дж/(м}^3 \text{ К}^2)$$

то розподіл температури буде описуватися одновимірним рівнянням теплопровідності

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ Вт/м}^3. \quad (10)$$

Слід, однак, підкреслити, що з практичної точки зору з достатньою точністю розподіл температури у квазітвердому КПТ може завжди визначитися простим рівнянням теплопровідності.

Другий член у лівій частині рівняння (4) є поправкою порядку $(C_p - C_v)/C_v$ до першого члену. Але у квазітвердих КПТ різниця між теплоємностями C_p й C_v , Дж/(м³ К), зазвичай доволі мала. Якщо знехтувати поправкою, то рівняння теплопровідності у квазітвердих КПТ можна завжди записати у вигляді

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_v} \Delta T = a \Delta T, \text{ К/с}, \quad (11)$$

де $a = \kappa/C$ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; C – певна середня об'ємна теплоємність, Дж/(м³ К).

Теплопровідність анізотропних квазітвердих КПТ. У анізотропному квазітвердому КПТ напрямком потоку теплоти q , Вт/м², не повинен збігатися з напрямком градієнту температури ∇T , К/м. Тому в анізотропному квазітвердому КПТ має місце більш загальна залежність

$$q_i = -\kappa_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}, (i, k) = \overline{(1,3)}, \text{ Вт/м}^2, \quad (12)$$

де κ_{ik} – тензор теплопровідності другого рангу для анізотропного квазітвердого КПТ, Вт/(м К). Для індексів, що повторюються у формулі (12) використано правило суми А. Ейнштейна. Від-

повідно до цієї залежності рівняння теплопровідності (11) буде мати більш загальний вигляд

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_{ik} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_k}, \text{ Вт/м}^3. \quad (13)$$

Про тензор теплопровідності квазітвердого анізотропного КПТ можна довести загальну теорему, згідно з якою κ_{ik} , Вт/(м К) є симетричним тензором

$$\kappa_{ik} = \kappa_{ki}, (i, k) = \overline{1, 3}, \text{ Вт/(м К)}. \quad (14)$$

Співвідношення (14) є наслідком принципу симетрії кінетичних коефіцієнтів і доведене нижче.

Швидкість збільшення повної ентропії анізотропного квазітвердого КПТ завдяки незворотності процесів теплопровідності

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{повна}} &= - \int \frac{\text{div } \vec{q}}{T} dV = \\ &= - \int \text{div} \left(\frac{\vec{q}}{T} \right) dV + \int \vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) dV, \text{ Вт/К}. \end{aligned} \quad (15)$$

Перший інтеграл у (15) є нульовим, що доводиться після перетворення його в інтеграл за поверхнею. Таким чином

$$\dot{S}_{\text{повна}} = \int \vec{q} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) dV = - \int \frac{\vec{q} \cdot \nabla T}{T^2} dV, \text{ Вт/К} \quad (16)$$

або

$$\dot{S}_{\text{повна}} = - \int \frac{1}{T^2} q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} dV, \text{ Вт/К}. \quad (17)$$

У даному випадку відповідають визначенню [1] кінетичних коефіцієнтів параметри $T^2 \kappa_{ik}$ у співвідношеннях

$$q_i = -T^2 \kappa_{ik} \frac{1}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \text{ Вт/м}^2, (i, k) = \overline{1, 3} \quad (18)$$

Тому з симетрії кінетичних коефіцієнтів безпосередньо впливає шукане співвідношення (14).

Квадратична форма

$$-q_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \kappa_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_k}, \text{ Вт К/м}^3, \quad (19)$$

повинна бути суттєво додатною, оскільки додатною повинна бути похідна (17), Вт/(К с), від ентропії, Вт/к за часом t , с. Умовою суттєвої додатності квадратичної форми є додатність головних значень матриці її коефіцієнтів. Тому всі головні значення тензора теплопровідності анізотропного квазітвердого КПТ κ_{ik} , Вт/(м К), завжди додатні, що впливає з міркувань про напрямок теплового потоку.

Кількість різних незалежних компонентів тензора κ_{ik} , Вт/(м К), залежить від симетрії анізотропного квазітвердого КПТ. Оскільки цей тензор симетричний, зазначена кількість така ж, як і в симетричному тензорі теплового розширення другого рангу α_{ik} , К^{-1} .

В ізотропних КПТ теплове розширення відбувається одночасно у всіх напрямках. Тому тензор деформації при вільному тепловому розширенні

$$\mathbf{u}_{ik} = \frac{1}{3} \alpha (T - T_0) \delta_{ik}, \quad (20)$$

де δ_{ik} – тензор Кронекера, T_0 – початкова температура КПТ, К, T – поточна (у момент часу t , с) температура КПТ, К. Для анізотропних тіл слід записувати

$$\mathbf{u}_{ik} = \frac{1}{3} \alpha_{ik} (T - T_0), \quad (21)$$

де α_{ik} – деякий тензор другого рангу, симетричний за індексами i, k , К^{-1} . Цей тензор є аналогом коефіцієнта теплового розширення для анізотропного випадку.

З'ясуємо число різних незалежних компонентів цього тензора в анізотропних тілах різних систем симетрії. Для цього найпростіше скористатися відомим з тензорної алгебри правилом, що будь-якому симетричному тензору другого рангу можна привести у відповідність деякий тензорний еліпсоїд [1]. З міркувань симетрії безпосередньо очевидно, що при триклінній, моноклінній та ромбічній симетриях еліпсоїд є тривісним (тобто довжини всіх його осей різні). З тетрагональної, ромбоєдричної й гексагональної симетрії еліпсоїд повинен бути еліпсоїдом обертання (з віссю, відповідно, уздовж всієї симетрії C_4 , C_3 або C_6). Кубічна симетрія призводить до виродження еліпсоїда у кулю. Але тривісний еліпсоїд визначається трьома незалежними величинами

(довжинами осей), еліпсоїд обертання – двома, а куля – усього однією (радіусом). Таким чином, число незалежних компонентів тензора α_{ik} , K^{-1} , в анізотропних тілах різної системи симетрії є:

- триклінна, моноклінна, ромбічна – три;
- тетрагональна, ромбоєдрична, гексагональна – дві;
- кубічна – одна.

Анізотропні тіла перших трьох систем симетрії зазвичай називають двовісними, а других трьох – одновісними. Зазначимо, що теплове розширення анізотропних тіл кубічної системи симетрії визначаються всього однією величиною. Отже, вони поведуться стосовно теплового розширення як ізотропні тіла.

Наведемо узагальнену систему диференціальних рівнянь у частинних похідних за часом та просторовою координатами, яка описує теплопровідність квазітвердого анізотропного КПТ та його деформацію, як нерівномірної нагрітого тіла. При цьому вважаємо, що КПТ має кубічну симетрію або є ізотропним тілом стосовно теплового розширення. Маємо

$$\begin{cases} C_v \frac{\partial T}{\partial x_k} - \frac{C_p - C_v}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{div} \vec{u}) = \\ = \kappa_{ik} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_k}, (i, k) = \overline{(1, 3)}; \\ 2(1 - \sigma) \nabla (\operatorname{div} \vec{u}) - (1 - 2\sigma) \operatorname{rot} (\operatorname{rot} \vec{u}) = \\ = \frac{2\alpha(1 + \sigma)}{3} \nabla T. \end{cases} \quad (22)$$

З системи (22) можна визначити вектор переміщення/деформації анізотропного квазітвердого КПТ шляхом розв'язання рівняння

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} (\operatorname{rot} \vec{u}) &= \nabla \left(\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \frac{\alpha}{C_p - C_v} \times \right. \\ &\times \left. \left(\kappa_{ik} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i \partial x_k} - C_v \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{2\alpha(1 + \sigma)}{3(1 - 2\sigma)} T \right), \\ (i, k) &= \overline{(1, 3)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Якщо враховувати, що теплове розширення анізотропного квазітвердого КПТ описує тензор α_{ik} , K^{-1} , другого рангу, симетричний за індексами i, k , замість рівняння (23) матимемо

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \vec{u}) = \nabla \left(\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \frac{\alpha_{ij}}{C_p - C_v} \times \right.$$

$$\left. \times \left(\kappa_{jk} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_k} - C_v \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{2\alpha_{ik}(1 + \sigma)}{3(1 - 2\sigma)} T \right),$$

$$(i, j, k) = \overline{(1, 3)}. \quad (24)$$

Отже, у випадку анізотропного квазітвердого КПТ градієнти функції температури ∇T , K/m , та її похідних за часом і просторовими координатами:

- $\nabla(\partial T/\partial t)$, $K/(m \cdot s)$,
- $\nabla \Delta T$, $K/(m \cdot s)$,
- $\partial^2 T/(\partial x_j \cdot \partial x_k)$, K/m^2 –

приводять до генерації в таких КПТ вихрових механічних полів переміщень/деформацій ($\operatorname{rot} u \neq 0$).

В'язкість квазітвердого КПТ. При вивченні руху у квазітвердих КПТ зазвичай вважають, що процес деформування є зворотним. У дійсності процес термодинамічно зворотний тільки якщо він відбувається з нескінченно малою швидкістю, тому в кожний момент часу в КПТ встигає встановитися стан термодинамічної рівноваги. Реальний рух відбувається зі скінченною швидкістю. КПТ не знаходиться у кожний даний момент у рівновазі. Тому в ньому відбуваються процеси, які намагаються привести його до рівноважного стану. Наявність цих процесів і призводить до незворотності руху. Зокрема, відбувається дисипація механічної енергії, яка переходить у теплоту в кінцевому підсумку. Під механічною енергією в даній роботі розуміється сума кінетичної енергії макроскопічного руху у квазіпружному/квазітвердому КПТ та його потенціальної (пружної) енергії, обумовленої наявністю деформації.

Дисипація енергії обумовлена процесами двох типів. По-перше, за неоднакової температури в різних місцях квазітвердого КПТ у ньому виникають незворотні процеси теплопровідності. По-друге, якщо у квазітвердому КПТ відбувається якийсь внутрішній рух, то наявні незворотні процеси, пов'язані зі скінченною швидкістю руху. Ці процеси дисипації енергії можна назвати, як і у рідинах, процесами внутрішнього тертя або в'язкості.

У більшості випадків швидкість макроскопічного руху у квазітвердому КПТ настільки мала, що дисипація енергії незначна. Такі «майже зворотні» процеси можуть бути описані за допомогою дисипативної функції [1].

Якщо існує деяка механічна система, рух якої супроводжується дисипацією енергії, то рух може бути описаний за допомогою звичайних рівнянь руху. У цих рівняннях слід до сил, що діють на систему, долучити так

звані «дисипативні сили» або «сили тертя», які є мінімальними функціями швидкостей. Ці сили можуть бути враховані у формі похідних за швидкостями від деякої квадратичної функції швидкостей, яка зветься дисипативною функцією ψ , Вт/м³, віднесеною на одиницю об'єму. «Сила тертя» на одиницю об'єму f_a , яка відповідає якійсь із узагальнених координат q_a системи, м, може бути записана у вигляді

$$f_a = -\frac{\partial \psi}{\partial \dot{q}_a}, \text{ Н/м}^3, \quad (25)$$

де \dot{q}_a – швидкість, м/с.

Дисипативна функція ψ , Вт/м³, є суттєво додатною квадратичною формою швидкостей \dot{q}_a , м/с. Зі співвідношення (25) при нескінченно малому процесі зміни швидкостей $\delta \dot{q}_a$, м/с, зміна дисипативної функції становитиме

$$\delta \psi = -\sum_a f_a \cdot \delta \dot{q}_a, \text{ Вт/м}^3, \quad (26)$$

де δ – символ варіації, тобто нескінченно малої зміни функції.

Можна також показати, що подвоєна дисипативна функція 2ψ , Вт/м³, визначає зменшення механічної енергії, Дж/м³, системи у одиницю часу, с.

Легко узагальнити співвідношення (26) на випадок руху з тертям у суцільному квазітвердому КПП. У цьому випадку стан системи визначається неперервним рядом узагальнених координат. Цими координатами є вектор зміщення \vec{u} , м. Відповідне цьому співвідношенню цій точці квазітвердого КПП. Відповідне цьому співвідношенню (26) рівняння повинне бути написано у інтегральному виді:

$$\delta \int \psi dV = - \int f_i \delta u_i dV, \quad (27)$$

де f_i – компонента вектора f , Н/м³, сили, що діє на одиницю об'єму тіла. У рівнянні (27) повна дисипативна функція всього КПП записана у вигляді $\int \psi dV$, Вт.

Визначимо тепер загальний вигляд дисипативної функції ψ , Вт/м³, для деформованих квазітвердих КПП. Ця функція повинна дорівнювати нулю, якщо в КПП відсутній внутрішній рух. Частинними випадками є тільки поступальний або обергальний рух як ціле. Тобто дисипативна функція повинна перетворюватися на нуль при незмінному векторі переміщень $\vec{u} = \text{const}$, м, або при похідній його за часом t , с, $\dot{u} = [\vec{\Omega} \times \vec{r}]$, м/с. Це означає, що функція ψ , Вт/м³,

повинна залежати не від самої швидкості, а від її градієнта. Вона може складатися лише з таких комбінацій похідних, котрі перетворюються у нуль при $\dot{u} = [\vec{\Omega} \times \vec{r}]$. Такими є суми

$$\tilde{S}_{ik} = \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \dot{u}_k}{\partial x_i}, \text{ с}^{-1}, \quad (28)$$

тобто похідні \dot{u}_{ik} , с⁻¹, тензора деформації за часом t , с. Таким чином, дисипативна функція повинна бути квадратичною функцією від \dot{u}_{ik} , с⁻¹. Найбільш загальний вигляд такої функції

$$\psi = \frac{1}{2} \eta_{iklm} \dot{u}_{ik} \dot{u}_{lm}, \text{ Вт/м}^3, \quad (29)$$

де η_{iklm} – тензор четвертого рангу, Дж·с/м³, який може бути названий тензором в'язкості квазітвердого КПП. Цей тензор має очевидні властивості симетрії

$$\eta_{iklm} = \eta_{lmik} = \eta_{kilm} = \eta_{ikml}, \text{ Дж·с/м}^3. \quad (30)$$

В ізотропному квазітвердому КПП тензор η_{iklm} , Дж·с/м³, має всього дві незалежні компоненти. Отже, функція ψ , Вт/м³, може бути записана у вигляді

$$\psi = \eta \left(\dot{u}_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \dot{u}_{ee} \right)^2 + \frac{\zeta}{2} \dot{u}_{ee}^2, \text{ Вт/м}^3, \quad (31)$$

де η та ζ – два коефіцієнти в'язкості, Дж·с. Оскільки ψ , Вт/м³, є суттєво додатною функцією, тоді коефіцієнти η та ζ , Дж·с, повинні бути додатними.

Вираз для «дисипативної сили» f_i , Н/м³, через тензор \dot{u}_{ik} , с⁻¹, може бути записаний безпосередньо по аналогії з тим, як вільна енергія квазітвердого КПП F_i , Дж/м³, виражається через \dot{u}_{ik} . Маємо

$$f_i = \frac{\partial \sigma'_{ik}}{\partial x_k}, \text{ Н/м}^3, \quad (32)$$

де σ'_{ik} «дисипативний» тензор напружень, що визначається за формулою

$$\sigma'_{ik} = \frac{\partial \psi}{\partial \dot{u}'_{ik}} = \eta_{iklm} \dot{u}_{lm}, \text{ Па}. \quad (33)$$

Урахування в'язкості в рівняннях руху може бути здійснене, відповідно, простим шляхом

заміни тензора напружень σ'_{ik} , Па, у цих рівняннях сумою $\sigma_{ik} + \sigma'_{ik}$, де σ_{ik} – тензор напружень, Па, від деформації.

В ізотропному квазітвердому КПТ

$$\sigma'_{ik} = 2\eta \left(\dot{u}_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \dot{u}_{ee} \right) + \zeta \dot{u}_{ee} \delta_{ik}, \text{ Па.} \quad (34)$$

Цей вираз формально збігається з виразом для в'язкого тензора в рідині.

Висновки. Обґрунтовано фізично-механічну та математичну моделі процесів теплопровідності у музейних експонатах, які є квазітвердими КПТ. Ці експонати під дією змінних параметрів мікроклімату знаходяться в нерівноважному стані. У них постійно перебігають процеси теплопровідності та деформації, що інтенсифікує старіння та деструкцію. Визначе-

на система диференціальних рівнянь у частинних похідних за часовою та просторовою координатами, яка описує просторово-часовий розподіл температури та вектора переміщень у КПТ. Враховано ефекти анізотропії коефіцієнтів теплопровідності та теплового розширення квазітвердого КПТ. Отримана в роботі дисипативна функція для квазітвердих КПТ в ізотропному випадку повинна бути врахована в рівняннях руху тіла при описі ефектів внутрішнього тертя у ньому. Результати роботи можуть бути в подальшому використані для уточнення й удосконалення інженерних методів розрахунку параметрів теплопровідності квазітвердих КПТ та ефектів внутрішнього тертя при їхньому моделюванні методами математичної фізики.

Література

1. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1965 – 204 с.
2. Панин В. Е. Спектр возбужденных состояний и вихревое механическое поле в деформируемом кристалле / В. Е. Панин, Ю.В. Гринеев, В.Е. Егорушкин и др. // Известия вузов. Физика. – 1987. – Т. 30. – №1 – С. 34-51.
3. Зуев Л. Б. Пластическое течение как волновой процес / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, Н. М. Мних, А. И. Олемской // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – №10. – С. 79-81.

References

1. Landau L.D., Lifshitz L. D. *Teoreticheskaja fizika. Vol. VII. Teoriia uprugosti*. Nauka, 1965.
2. Panin V. E., Grineev Yu. V., Yegorushkin V. Ye. I dr. “Spektr vzbuzhdennykh sostoianii i vikhrevoe mekhanicheskoe pole v deformiruемом kristalle”. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1987. T. 30. No 1. P. 34-51.
3. Zuev L. B., Danilov V. I., Mnikh N. M., Olemskoi A.I. “Plasticheskoe techenie kak volnovoi process”. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgija*. 1990. №10. P. 79-81.

УДК 539.3

Функциональный анализ теплопроводности и вязкости квазитвёрдых капиллярно-пористых тел при переменных параметрах воздушной среды при музейном хранении

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², М. А. Шишина³, А.С. Москвитина⁴

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

⁴асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

Аннотация. Приведён фундаментальный анализ теплопроводности и вязкости квазитвёрдых капиллярно-пористых тел (КПТ), которые являются материалами предметов музейного хранения. Среди прочего это – краски на картине, окрашенные ткани и др. Изменение параметров воздушной среды приводит к возникновению градиента температуры в КПТ. Получена система дифференциальных уравнений в частных производных по времени и пространственным координатам, адекватно описывающая процесс теплопроводности в квазитвёрдых КПТ, в

которой учтена анизотропия тепловых параметров КПП, в частности, его коэффициентов теплового расширения и теплопроводности. Для анализа вязкости квазитвёрдых КПП определена диссипативная функция для изотропного и анизотропного случаев. Учёт вязкости в уравнениях движения может быть осуществлен путём замены тензора напряжений на тензор, который дополнительно учитывает еще и «диссипативный» тензор напряжений.

Ключевые слова: теплопроводность, вязкость, квазитвёрдое капиллярно-пористое тело, диссипативная функция.

UDC 539.3

Functional analysis of thermal conductivity and viscosity of quasi-solid capillary-porous bodies under varying air environment conditions during museum storage

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovniuk², M. Shyshyna³, A. Moskvitina⁴

¹Dr. Hab., professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

⁴Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

Abstract. Fundamental analysis of the thermal conductivity and viscosity of quasi-solid capillary-porous bodies (CPBs), which are museum exhibits' materials, is presented. The air environment parameters change leads to a temperature gradient in the CPBs. Non-uniform heating of the solid medium, in particular, quasi-solid CPB, is not accompanied by convection, and heat transfer is carried out only due to the mechanism of thermal conductivity. In order to create a mathematical model of this process in CPB, a system of partial differential equations in time and space coordinates is obtained. The resulting system adequately describes the thermal conductivity process in quasi-solid CPBs. The anisotropy of CPB's thermal parameters, especially, its coefficients of thermal expansion and thermal conductivity, is also taken into account. Theoretically, the deformation process during motion in quasi-solid CPB is taken as reversible. In real conditions, the process is thermodynamically reversible only when it occurs at an infinitesimal speed. Then at each point in time, the CPB is able to establish a thermodynamic equilibrium state. Real motion occurs at a finite velocity, the CPB is not in an equilibrium state at any given moment, so there are endogenous processes that try to get it into a balanced condition. The occurrence of these processes causes the irreversibility of motion, which acts, in particular, through the dissipation of mechanical energy, which eventually turns into heat. The energy dissipation is caused by irreversible processes of thermal conductivity and processes of internal friction or viscosity. The dissipative function for isotropic and anisotropic cases was determined in order to analyze the viscosity of quasi-solid CPBs. The viscosity in the equations of motion can be considered by replacing the stress tensor with a tensor, which additionally takes into account the "dissipative" stress tensor.

Keywords: thermal conductivity, viscosity, quasi-solid capillary-porous body, dissipative function.

Надійшла до редакції / Received 03.09.2020



ВЕНТС ВУТ/ВУЕ В(Б) ЕС А14/А21

Припливно-витяжні установки
з продуктивністю до **690** м³/год
у тепло- та звукоізольованому корпусі.

Ефективність рекуперації – до **93** %

УДК 536.7:539.57

Термодинамічний аналіз твердіння пасто- й рідиноподібних елементів музейних експонатів під впливом мікрокліматичних умов приміщення

В. Б. Довгалюк¹, Ю. В. Човнюк², В. Т. Кравчук³, А. С. Москвітіна⁴, М. О. Шишина⁵

¹д.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, ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

³к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, vtk1@ukr.net

⁴асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, shyshyna.mo@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9384-7662

Анотація. Процес реставрації музейних експонатів пов'язаний з формуванням різноманітних структурних середовищ, наприклад, висихання шарів фарб, лаків та твердіння гіпсових і бетонних розчинів. Механіка таких середовищ характеризується спектрами в'язких, пластичних та пружних властивостей у різних їхніх сполученнях. На формування цих середовищ впливають мікрокліматичні умови приміщень, у яких відбуваються ці процеси. Вивчення та керування процесом структуроутворення для отримання середовища із заданими властивостями є важливою технологічною задачею, що вирішується, зокрема, і системами формування мікроклімату. Зміна структурного стану середовища, яке твердіє, може бути оцінена за відповідними змінами пластичної та звичайної механічної міцності, ступеня гідратації, тепловиділення, модуля пружності та ін. У даній роботі під структуроутворенням розуміють процес, у результаті котрого характеристики матеріалу наближаються до характеристик відповідного капілярно-пористого тіла (КПТ), а основним параметром, котрий визначає це наближення, є ступінь завершеності структуроутворення. Аналіз процесу твердіння розглянутих пасто- й рідиноподібних середовищ залежно від стану повітряного середовища на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури вказаних середовищ і оцінювати взаємодію хімічних реакцій і процесу структуроутворення, а отримані зміни швидкості структуроутворення – виявляти й оцінювати деструктивні процеси, які відбуваються при твердінні речовини.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, структуроутворення, консистентність, твердіння, пасто- й рідиноподібні середовища, характеристики, капілярно-пористі тіла.

Постановка проблеми. На даний момент важливою та актуальною проблемою є довгострокове зберігання експонатів музеїв (серед яких капілярно-пористі тіла) при впливі на них штучного освітлення, теплових потоків від відвідувачів, штучного клімату. Для того, щоб прогнозувати подальшу динаміку та поведінку (як параметрів, характеристик, так і самих тіл в цілому) об'єктів дослідження необхідно починати з процесу структуроутворення капілярно-пористих тіл (наприклад процес твердіння лаків, фарб або застигання гіпсових/бетонних статур/оздоблення).

Актуальність дослідження. Аналіз процесу твердіння розглянутих пасто- й рідиноподібних середовищ/тіл під впливом повітряного середовища приміщень на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури вказаних середовищ і оцінювати взаємодію хімічних реакцій і процесу структуроутворення. Отримані зміни швидкості структуроутворення допомагають виявляти й оцінювати деструктивні процеси, які відбуваю-

ться при твердінні речовини.

Останні дослідження та публікації. У зв'язку з розвитком механізації ряду технологічних процесів у найрізноманітніших галузях сучасної промисловості зараз прискореними темпами розширюється кількість операцій, пов'язаних з формозміною різноманітних структурованих середовищ. До таких операцій можна віднести переробку, транспортування вздовж трубопроводів і формування полімерних розчинів і розплавів, будівельних сумішей, харчових мас [1], які є нелінійними рідинами або пастоподібними середовищами зі складним характером течії. Механіка таких середовищ характеризується спектрами в'язких, пластичних та пружних властивостей у різних їхніх сполученнях. В технологічних операціях відбуваються, як правило, великі зсувні деформації, які набагато перевищують межу пружності. Тому найбільш суттєвими для технологічних розрахунків є в'язкопластичні властивості. Вони показують зв'язок між наявними напруженнями зсуву τ , Па, і швидкістю незворотної зсувної деформації/течії $\dot{\gamma}$, s^{-1} ,

[2-3].

Формулювання цілей статті. Задля якісного опису зв'язку між наявними напруженнями зсуву τ , Па, та швидкістю незворотної зсувної деформації $\dot{\gamma}$, с^{-1} , прийнято використовувати криві консистентності, які зв'язують ці величини, або залежності коефіцієнта ефективної в'язкості $\eta^* = \tau/\dot{\gamma}$, Па·с, від швидкості незворотної зсувної деформації $\dot{\gamma}$, с^{-1} . Для узагальнення та подальшого аналізу впливових факторів важливо мати рівняння консистентності у найбільш простій формі. Воно дозволяє безпосередньо з даних реологічного експерименту отримати інваріантні характеристики для кожної речовини (рідини, суміші, тощо). Це найбільш просто можна зробити шляхом проектування кривої консистентності у перетворених координатах, які дозволяють з достатньою точністю знаходити лінійну координацію між експериментальними величинами [2].

Основна частина.

1. Варіанти рівнянь консистентності структурованих (настоподібних й рідноподібних) середовищ.

Часто проектування кривої консистентності в перетворених координатах вдається шляхом використання логарифмічних координат $Y = \ln \eta$ й $X = \ln \dot{\gamma}$. У дослідях із сумішами на ротатійному реометрі «кільце – кільце» [4] найбільш зручними координатами для вирівнювання окремих ділянок кривої $\eta^*/\eta_0 = \Phi(\dot{\gamma}) \in Y = \ln \eta$ й $X = \ln \dot{\gamma}$, с^{-1} , де η – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па·с, а η_0 – початкова динамічна в'язкість середовища, Па·с.

У цьому випадку коефіцієнт ефективної в'язкості η^* визначається рівнянням

$$\eta^* = \eta_0 e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (1)$$

де β – емпіричний коефіцієнт, с^{-1} , що показує інтенсивність падіння коефіцієнта ефективної в'язкості $\eta^* = \tau/\dot{\gamma}$, Па·с, зі зростанням швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} . У рівнянні (1) коефіцієнт динамічної в'язкості η_0 , Па·с, відповідає $\dot{\gamma} \rightarrow 0$. Сімейство кривих (1) при різних β показана на рис. 1. За формулою (1) крива консистентності (рис. 2) має рівняння

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}}, \text{ Па}. \quad (2)$$

Координаті $\dot{\gamma} = \beta$, с^{-1} , відповідає максимальне значення напруження τ_{max} , Па.

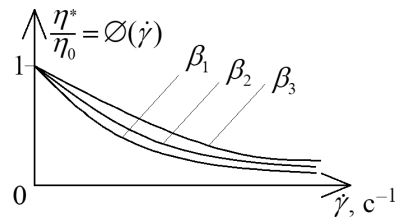


Рис. 1. Залежність відношення η^*/η_0 від швидкості зсувної течії $\dot{\gamma}$, с^{-1} згідно з рівнянням (1): $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$; $\beta_{1,2,3} = \text{const}$

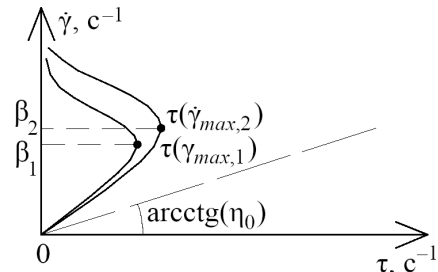


Рис. 2. Сімейство кривих консистентності відповідно до рівняння (2): $\dot{\gamma}_{max,1} = \beta_1$; $\dot{\gamma}_{max,2} = \beta_2$; $\tau(\dot{\gamma}_{max,1}) = \tau_{max,1} = \eta_0 \beta_1 e^{-1}$; $\tau(\dot{\gamma}_{max,2}) = \tau_{max,2} = \eta_0 \beta_2 e^{-1}$

Для розширення області застосування кривих консистентності практичний інтерес представляють деякі найбільш загальні форми рівняння (2). Так, наприклад, рівняння кривої (рис. 3) консистентності структурованої рідини (крива Оствальда [5]), має вигляд

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па}, \quad (3)$$

де η_∞ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с, при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$. Член $\eta_\infty \dot{\gamma}$, Па, у рівнянні (3) при цьому відповідає ньютонівській течії повністю зруйнованої структури. Спрямляється ця крива в координатах $Y = \ln(\eta^* - \eta_\infty)$ і $X = \dot{\gamma}$, с^{-1} . Звідси неважко отримати $\ln(\eta_0)$ та β . η_∞ , Па·с, знаходиться із дослідів, проведених при достатньо значних величинах $\dot{\gamma}$.

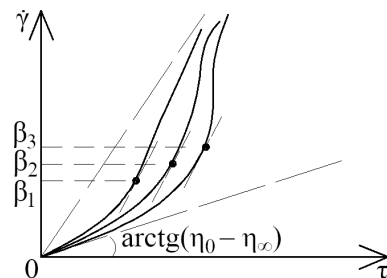


Рис. 3. Сімейство кривих консистентності структурованої рідини (крива Оствальда) відповідно до рівняння (3), де $(\beta_1 < \beta_2 < \beta_3)$

Для опису нелінійної течії пластиків [6] слід початок течії пересунути на величину граничного напруження зсуву τ_0 , Па. При цьому не слід зсувати радіальну ділянку, що відповідає ньютонівській течії зруйнованої структури

з коефіцієнтом динамічної в'язкості η_∞ , Па. Рівняння кривої консистентності (рис. 4) набуває ще більш загального характеру

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}) e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\beta}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па.} \quad (4)$$

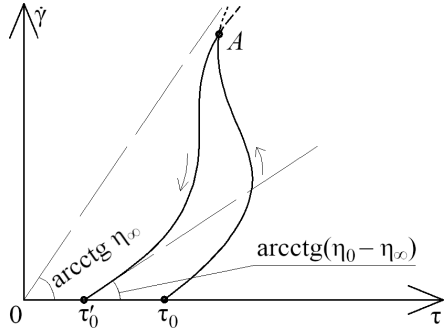


Рис. 4. Гістерезисна петля тіксотропії нелінійного пластика відповідно до рівняння (4) або (5)

Випрямлення рівняння (4) можна здійснити у тих же координатах, що і (3). Значення $\ln((\tau/\dot{\gamma}) + \eta_0)$ легко знайти у вигляді відрізка на координаті Y . Коефіцієнт β , c^{-1} , відповідає нахилу отриманої прямої.

Для опису обох гілок тіксотропної (за наявності навіть постійної швидкості деформації рідини в'язкість поступово зменшується) кривої також можна використати рівняння (4) у наступній модифікації

$$\tau = (\chi(\dot{\gamma} \eta_0 + \tau_0) + (\chi - 1)(\dot{\gamma} \eta'_0 + \tau'_0)) \times e^{(k\chi - k'(1-\chi))\dot{\gamma}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па,} \quad (5)$$

де χ – функція включення, що має вигляд

$$\chi = \begin{cases} +1 & \text{при навантаженні;} \\ 0 & \text{при розвантаженні;} \end{cases} \quad (6)$$

k – емпіричний коефіцієнт, c , обернений до β ; величини без штриха відповідають правій гілці петлі тіксотропії, а зі штрихом – лівій.

Рівняння (5) і (6) дозволяють аналітично розрахувати площу отриманої таким чином петлі в'язкого гістерезису, а саме

$$S = \int_0^{\dot{\gamma}_A} (\tau(\dot{\gamma})|_{\chi=1} - \tau(\dot{\gamma})|_{\chi=0}) d\dot{\gamma}, \text{ Па}\cdot\text{с,} \quad (7)$$

де $\dot{\gamma}_A$ – швидкість $\dot{\gamma}$, c^{-1} , у точці A перетину віток петлі гістерезису. Її можна знайти з наступного трансцендентного рівняння

$$\tau(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=\dot{\gamma}_A; \chi=1} = \tau(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma}=\dot{\gamma}_A; \chi=0}, \text{ Па,} \quad (8)$$

або після підставлення рівняння (5)

$$(\dot{\gamma}_A \eta_0 + \tau_0) \times e^{k\dot{\gamma}_A} + \eta_\infty \dot{\gamma}_A = -(\dot{\gamma}_A \eta'_0 + \tau'_0) e^{-k\dot{\gamma}_A} + \eta_\infty \dot{\gamma}_A, \text{ Па.} \quad (9)$$

Коефіцієнт ефективної в'язкості, Па·с, концентрованих дисперсних систем [6] та нелінійних рідин [5] із зростанням $\dot{\gamma}$ завжди знижується (псевдопластичні рідини / середовища). Проте, як було зазначено у [3], не завжди це зниження має експоненціальний характер, який відповідає рівнянню (1). У [5] зазначені основні фізичні причини та механізми, за яких середовище/тіло проявляє властивості псевдопластичності. Нижче викладений основний зміст цих міркувань.

Різні реологічні моделі середовищ (наприклад, Оствальда-де-Віля, Рабіновича, Бріана, Кессона, Балклі-Гершеля, Шульмана) виявляють одну й ту ж спільну особливість механічної поведінки при зсувній течії, а саме псевдопластичність. Прикладами псевдопластичних рідин можуть слугувати (полі)-етиленгліколь, гліцерин, мазути, загущені палива, розчини каучуку, змащування й мастила різних типів, розплави та розчини полімерів, нафти та багато високов'язких нафтопродуктів, паперові пульпи, фарби, фармацевтичні засоби (емульсії, креми, пасти), багато харчових продуктів (сметана, жири), біологічні рідини (кров, плазма, синовіальні рідини) тощо. Прояв псевдопластичності полягає в зменшенні уявної (ефективної) в'язкості зі зростанням напруження (швидкості) зсуву. Середовище немов би “розріджується” та стає більш рухливим.

У нерухомому дисперсному середовищі несферичні часточки або молекули дезорієнтовані хаотичним тепловим рухом. У неоднорідному полі швидкості ($\dot{\gamma} \neq 0$) кінці часток будуть знаходитися під впливом неоднакового (неоднорідного) силового поля з боку рухомого середовища. Виникає обертальний момент, який намагається розмістити часточку вздовж вектора швидкості течії.

Таким чином, лінійність кривої течії й відповідний найбільший коефіцієнт ньютонівської в'язкості μ_0 , Па·с, за малої швидкості зсуву обумовлені переважанням броунівського руху над порівняно слабким орієнтувальним ефектом течії. Ньютонівська поведінка в області великої швидкості зсуву і відповідний коефіцієнт в'язкості μ_∞ , Па·с, пов'язані з граничною оріє-

нтацією часток, що превалює над тепловими рухами. Зрозуміло, що $\mu_0 > \mu_\infty$, Па·с, оскільки рух дисперсійного середовища відносно хаотично розміщених часток (молекул) повинен супроводжуватися набагато більшим розсіюванням енергії, ніж у випадку упорядкованого їхнього розміщення.

Інше тлумачення псевдопластичності виходить з уявлення про наявність на частках сольватних оболонок і надмолекулярних структур. В'язкість залишається незмінною при зростанні напруження зсуву τ , Па, до деякої межі, поки не перевищено міцність зв'язку сольватної оболонки з поверхнею дисперсної фази.

З подальшим зростанням із сольватних оболонок вивільняється частина зв'язаного дисперсійного середовища. Це підвищує текучість дисперсної системи, оскільки зменшується фактична об'ємна концентрація часток. В'язкість буде спадати до повного руйнування сольватних оболонок.

Перевищення μ_0 над μ_∞ , Па·с, пояснюється тим, що за малих напружень рух середовища через ґратку більш крупних за розміром сольватованих часток більш стиснутий. Крім того, послаблюється взаємодія між частками у зв'язку зі зменшенням їхніх розмірів.

Відомі дисперсні системи, у яких залежність коефіцієнта динамічної в'язкості від напруження (швидкості) зсуву протилежна, тобто величина μ , Па·с, зростає зі зростанням напруження (швидкості) зсуву. Ця властивість, що отримала назву дилатантності, зустрічається, в основному, у грудко-дисперсних чи високонцентрованих систем. Перші дослідження дилатантності провів О. Рейнольдс [7, 8].

Загальноприйняте трактування механізму дилатантності спирається на зміни при зсуві пакетів часток твердої фази з таким збільшенням пористості, яке перевищує наявний об'єм незв'язаного дисперсного середовища. Тоді, поряд з прошарками рідини, всередині текучого середовища з'являються "порожнини" й сухі контакти, зачеплення твердої фази.

Дилатантність проявляють висококонцентровані водні суспензії порошоків двоокису титану, заліза, слюди, кварцу, крохмалю, водні розчини гуміарабіку, мокрий річковий пісок тощо.

Для цієї категорії моделей характерним є наявність межі текучості τ_0 , Па, тобто наявність деякого мінімального напруження зсуву, нижче якого течія відсутня.

Неважко показати, що криві консистентності з формою, аналогічною рис. 2...4, можуть бути також отримані, якщо в основу їхнього утворення закладена інша функція $\eta^*/\eta_0 = \mathcal{O}(\dot{\gamma})$,

яка має зовнішню схожість з кривою (1) на рис. 1. Тоді, наприклад, для нелінійного пластика в загальному випадку маємо

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}) \mathcal{O}(\dot{\gamma}) + \dot{\gamma} \eta_\infty. \quad (10)$$

Зазначимо, що рівняння (5) має більш загальну форму, ніж широко використовуване у практиці реології пластиків рівняння Шведова–Бінгама $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$, Па, яке може бути отримане при $\mathcal{O}(\dot{\gamma}) = 1$ та $\eta_\infty = 0$ ($\eta_0 \equiv \mu$, Па·с). Наприклад, якщо зниження η^* , Па·с, зі зростанням $\dot{\gamma}$, с^{-1} , має форму степеневі функції [3], яка спрямляється (приймає вигляд прямої) у подвійних логарифмічних координатах, тоді зручно прийняти, що

$$\eta^* = \mathcal{O}(\dot{\gamma}) = (1 + \dot{\gamma})^{-\tilde{k}}. \quad (11)$$

Це рівняння також відповідає рис. 1, а емпіричний коефіцієнт \tilde{k} відображає інтенсивність зниження коефіцієнта в'язкості η^* , Па·с зі зростанням швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} . Тоді консистентність нелінійного пластика описується рівнянням

$$\tau = (\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma})(1 + \dot{\gamma})^{-\tilde{k}} + \eta_\infty \dot{\gamma}, \text{ Па}. \quad (12)$$

Форма кривої за рівнянням (12) подібна до рис. 4. На відміну від формули (4) ордината точки, найбільш віддаленої від променя $\text{arctg}(\eta_\infty)$, дорівнює $1/(\tilde{k} - 1)$. Спрямлення цього рівняння з метою отримання його параметрів здійснюється в координатах $Y = \lg(\eta^* - \eta_\infty)$ та $X = \lg(1 + \dot{\gamma})$.

Відрізок на осі Y відповідає значенню $\lg((\tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma})/\dot{\gamma})$, а \tilde{k} – відповідає нахилу отриманої прямої. Подібним чином із використанням формули (11) можна отримати при $\tau_0 = 0$ рівняння консистентності нелінійної рідини.

Зазначимо, що в процесі нагрівання середовища, яке рухається в циліндричному каналі, відбувається поступове зниження межі плинності/текучості τ_0 , Па, й зменшується нахил кривих $\tau(\dot{\gamma})$. Тобто його коефіцієнт пластичної в'язкості μ_p , Па·с, спадає.

З'ясувалося [5], що, наприклад, для більшості фарб при температурі T , К, вище 333,15...343,15 К (60...70 °С) криві течії $\tau(\dot{\gamma})$, Па, стають ньютонівськими, тобто $\tau = \mu \dot{\gamma}$, Па. Подальший процес нагрівання змінює лише коефіцієнт в'язкості μ , Па·с.

Залежності $\tau_0(T)$, Па, і $\mu = \eta_m(T)$, Па·с, гарно описуються рівнянням виду [5]

$$\begin{cases} \tau_0(T) = \alpha e^{-bT}; \\ \eta_p \equiv \eta_{nl} \equiv \mu_p \equiv \mu_{nl} = \alpha_1 e^{-b_1 T}. \end{cases} \quad (13)$$

Дослідники реологічних властивостей різнотипних рідин роблять велику кількість спроб, щоб створити універсальну реологічну модель, спільну для всіх рідин широкого класу, наприклад, неньютонівських, чисто в'язких. [5]. Така модель мала б єдину криву течії, у той час як кожна з відомих зараз реологічних моделей – Кессона, Балклі-Гершеля та ін. – індивідуальна. Ці моделі мають стільки однотипних кривих течії, скільки мають конкурентних значень реологічні параметри в математичному записі моделі.

У роботі [9] також запропонована така універсальна крива течії, яка є модифікацією степеневого реологічного рівняння,

$$\tau = \bar{k} |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}, \quad n < 1. \quad (14)$$

Як зазначено вище, коефіцієнт неньютонівської в'язкості будь-яких текучих речовин у всьому можливому діапазоні зміни швидкості зсуву змінюється від одного постійного значення μ_0 , Па, до іншого μ_∞ , Па причому у загальному випадку псевдопластичних рідин $\mu_0 > \mu_\infty$, Па.

Типова крива (рис. 5) хода залежності $\mu_a \equiv \mu^* = \mu_a(\dot{\gamma}) \equiv \mu^*(\dot{\gamma})$, Па·с, крім двох горизонтальних ділянок має ще й нелінійну частину з точкою перетину $(\mu_n, \dot{\gamma}_n)$.

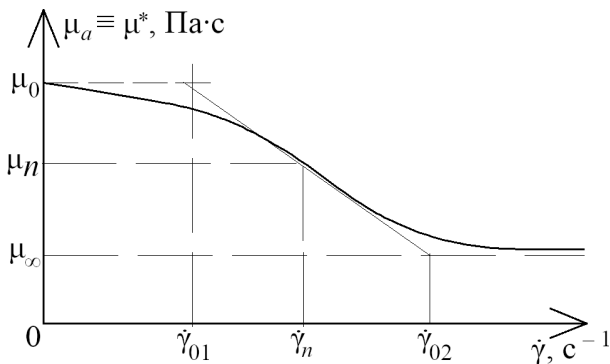


Рис. 5. Типова хода залежності $\mu_a(\dot{\gamma})$, Па·с, для псевдопластичних речовин/рідин

Таким чином,

$$\begin{cases} \mu \rightarrow \mu_0 & \text{при } \dot{\gamma} \rightarrow 0; \\ \mu \rightarrow \mu_\infty & \text{при } \dot{\gamma} \rightarrow \infty; \\ \mu = \mu_n; \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_n; & \text{при } \frac{d^2 \mu}{d \dot{\gamma}^2} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Універсальна реологічна модель для нелінійно-в'язкого середовища

$$M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} \Gamma^{2n+1} \right), \quad (16)$$

де $M = \alpha \lg(\mu/\mu_0)$ – безрозмірний ефективний коефіцієнт в'язкості; $\Gamma = \beta \lg(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_i) + \lambda$ – безрозмірна швидкість зсуву; $a_1, a_2, \dots, a_{2n+1}$ – константи; $\dot{\gamma}_i$ – значення швидкості $\dot{\gamma}$, с^{-1} , при $\Gamma = \lambda$; α, β і λ – реологічні параметри індивідуальних текучих речовин.

На практиці достатньо користуватися скороченою формою запису універсальної кривої течії

$$M = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} (\Gamma + 0,172 \Gamma^3 + 0,422 \Gamma^5). \quad (17)$$

При розв'язуванні крайових задач, однак, оперувати обома варіантами універсальної кривої течії за формулами (16) і (17) доволі важко. Для цієї мети пропонується лінеаризована форма кривої течії (рис. 6) [5]¹

$$M = \frac{1}{\pi} \left(- \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \operatorname{H} \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) + \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \operatorname{H} \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (18)$$

де $\operatorname{H}(\Gamma)$ – ступінчаста функція

$$\operatorname{H}(\Gamma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \Gamma < 0; \\ D & \text{при } \Gamma = 0; \\ 1 & \text{при } \Gamma > 0, \end{cases} \quad (19)$$

де D – у даному випадку довільне скінченне число, зручне для реалізації обчислень. У рівнянні (18) воно завжди множиться на нуль, тому не впливає на результат.

За формулами (18) і (19)

¹ Порівняння рис. 1.12 і формули (1.58) у роботі [5] показує наявність друкарської помилки. У зазначеній формулі пропущено знак мінус перед першим членом у квадратних дужках. Додання пропущеного знака дозволяє отримати відповідність до формули (1.59).

$$\begin{cases} M=0 & \text{при } \Gamma < -\frac{\pi}{2}; \\ M=-\frac{1}{\pi}\left(\Gamma + \frac{\pi}{2}\right) & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \Gamma < \frac{\pi}{2}; \\ M=-1 & \text{при } \Gamma > \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (20)$$

Неважко показати [5], що лінеаризована модель є модифікацією степеневого реологічного рівняння Оствальда-де-Віля (14).

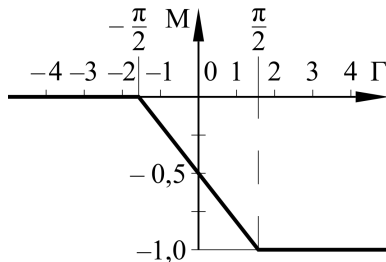


Рис. 6. Універсальна крива течії $M(\Gamma)$ (18) і (19) або (20)

У природних змінних умови формули (18) набувають вигляду

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 & \text{при } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi+2\lambda}{2\beta}}; \\ \mu = 10^{-\frac{2\lambda+1}{2\alpha}} \mu_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_n}\right)^{-\frac{\beta}{2\alpha}} & \text{при } \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi+2\lambda}{2\beta}} < \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi-2\lambda}{2\beta}}; \\ \mu = \mu_\infty & \text{при } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_n \cdot 10^{-\frac{\pi-2\lambda}{2\beta}}. \end{cases} \quad (21)$$

Таким чином, запропонована низка конкретних рівнянь, а також ряд рівнянь більш загальної форми, які дозволяють описувати реологічну поведінку нелінійних рідин і пластиків при стаціонарному варіанті зсувної течії. Ці рівняння дозволяють розраховувати поведінку матеріалів при реставрації музейних експонатів залежно від температури навколишнього середовища. Остання враховується через зміну реологічних параметрів.

Параметри отриманих рівнянь мають загальноприйнятний фізичний зміст:

- межа плинності/текучості τ_0 , Па;
 - коефіцієнт в'язкості незруйнованої структури η_0 , Па·с;
 - коефіцієнт в'язкості повністю зруйнованої структури η_∞ , Па·с;
- Параметр β або k може бути визначений як

міра тіксотропії.

Встановлений загальний характер функції $\varnothing(\dot{\gamma})$ залежить від вибору такої системи координат, у якій експериментатор може отримати спрямлення експериментальної кривої консистентності з максимальною кореляцією.

2. Термодинамічний аналіз процесу структуроутворення матеріалу при наближенні його характеристик до таких, що відповідають типовим капілярно-пористим тілам (КПТ).

Структуроутворення є важливим процесом у технології реставрації музейних експонатів. Зміна структурного стану речовини, що твердіють, може бути оцінена за відповідними змінами пластичної та звичайної механічної міцності, ступені гідратації, тепловиділення, модуля пружності тощо.

У даному дослідженні під структуроутворенням розумітимемо процес, у результаті якого характеристики матеріалу наближаються до характеристик відповідного типового капілярно-пористого тіла [10]. Основним параметром, який визначає це наближення, є степінь завершеності структуроутворення [10]

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{u_\tau - u_a}{u_{n_0}}, \quad (22)$$

де u_τ – вологовміст матеріалу, кг/кг; u_a – те ж, на стадії типової капілярно-пористої структури; u_{n_0} – те ж, при $\eta \equiv \mu = 0$; $\eta \equiv \mu$ – коефіцієнт динамічної в'язкості матеріалу, Па·с.

Початковим станом структури $\eta = 0$ є стан, який визначається величиною загального відносного тиску водяного шару $\psi = 1,12$ [11]. У цьому випадку часточки твердої фази речовини, що транспортується, не взаємодіють між собою.

При подальшому зниженні загального відносного тиску ψ або вологовмісту матеріалу u_m починається взаємодія твердих часточок, тобто розвиток внутрішнього поля міжмолекулярних сил. Цей процес обумовлює утворення капілярно-пористої структури матеріалу, яка описується виразом (20).

Зміна структурного стану для аналізу процесу твердіння матеріалу може бути описана діаграмою зміни вологовмісту матеріалу, у якій зміна певного рівня вологовмісту u_m , кг/кг, відповідає зміні потенціалу оводнення θ .

У роботі [12] наведена методика визначення величини потенціалу оводнення θ за умов ізотермічного твердіння матеріалу протягом певного відрізка (періоду) часу.

Методом відбору проб можна визначити кількість води, хімічно зв'язаної мінералами матеріалу, за величиною якої можна судити про ступінь гідратації системи, що твердіє. При цьому проби суміші обробляють спеціальною хімічною речовиною задля припинення реакцій гідратації та для видалення вільної води, яка не прореагувала. Після цього зразки висушують, а потім прожарюють (у спеціальних термічних печах) задля видалення зв'язаної у гідратних новоутвореннях води. Кількість води, яка хімічно-зв'язана наявними у матеріалі мінералами (або їхніми добавками), оцінюється за втратою маси проб при прожарюванні.

На основі отриманих експериментальних змін потенціалу оводнення θ й вологовмісту систем u_m , кг/кг, будують (рис. 7) діаграми $u_m = f(\theta, T)$. На рис. 7 подані також діаграми для відповідних станів типових капілярно-пористих структур $u_a = f(\theta, T)$, кг/кг, які розраховані, згідно з [13], за рівнянням

$$u_a = u_{M, \Gamma} \psi^a, \text{ кг/кг}, \quad (23)$$

де $u_{M, \Gamma}$ – максимальний сорбційний вологовміст, кг/кг; a – активність оводнення, тобто міра міжмолекулярної взаємодії, яка показує, у скільки разів збільшиться потенціальна енергія 1 моля води при переході з рівноважного пару води у поле сил оводнення даного тіла/речовини [13].

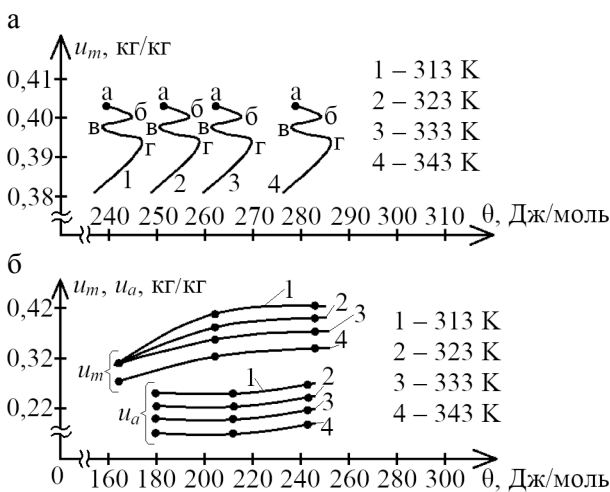


Рис. 7. Діаграми вологісного стану:
а – початкові ділянки; б – процеси кристалізаційного структуроутворення

У результаті аналізу експериментально отриманих ізоTERM (рис. 7) вологісний стан матеріалу у процесі його твердіння можна розділити послідовно на п'ять стадій, які характеризуються сингулярними точками на ізоТЕРмі

$\theta|_{T=\text{const}} = f(u_m)$, Дж/моль. У роботі [14] наведені подібні діаграми для твердіння мінеральних в'язучих без наявності на них ділянок "а"–"б"–"в", поява яких обумовлена безпосередньо процесом зди曼ня матеріалу.

На ділянці "а"–"б" відбувається процес хімічної взаємодії пудри металу з лугами, який є переважним порівняно з процесами гідратації та структуроутворення для даного періоду (при тужавінні, наприклад, сумішей, у яких присутні дрібні металеві частки).

Збільшення тиску всередині системи зі збільшенням потенціалу $\theta_{\tau} \equiv \theta|_{T=\text{const}} = f(u_m)$ на ділянці "а"–"б" обумовлене процесом газоутворення й, відповідно, зростанням тиску зди曼ня [15].

Розглядаємо в подальшому матеріал типу гіпсу або бетону, який твердіє. Під час зди曼ня відбувається збільшення деформації розширення внаслідок зменшення перерізу речовини між шпарами за рахунок збільшення діаметрів шпар. Це призводить до зростання внутрішніх напружень. З точки зору формування структури матеріалу процес зди曼ня є деструктивним. Точка "б" відповідає найбільшому розвитку внутрішніх напружень, які переважають над процесом структуроутворення, що збігається з даними робіт [16, 17]. У цей період можуть відбуватися такі небажані явища, як "кипіння", що призводить до руйнування утвореної структури й до повного чи часткового осадження здутої суміші.

Ділянка "в" – "г" на ізоТЕРмі (рис. 7) показує збільшення тиску всередині системи. Часточки в'язучого, які мають навколо себе водяну оболонку, під дією молекулярних сил зближуються одна з одною. Виникають контакти між колоїдними часточками й відбувається стискання системи [18, 19].

Після точки "г" незначному зменшенню вологовмісту системи відповідає різке зменшення ψ . У свою чергу це може бути викликане тим, що на межі поділу "пара – рідина" утворюються гнуті меніски. Таким чином, у системі, що досліджується, формується первісна капілярно-пориста структура. При цьому рідина фаза стає дискретною [14]. До початку цього періоду кількість новоутворень зростає. Частинок продуктів реакції зближуються. Утворюються умови, які викликають різке зростання міцності. У подальшому в результаті розвитку внутрішніх напружень швидкість зростання міцності сповільнюється. На наявність такого періоду в цементному тісті гіпсової/бетонної суміші вказують багато дослідників [18-21].

Як вже зазначено вище, у кінці четвертого

періоду незначному зменшенню вологовмісту системи відповідає доволі різка зміна ψ . Це можна пояснити тим, що ущільнення, яке продовжується, відбувається не рівномірно в усьому об'ємі, а в окремих його зонах [19]. У квазікристалічних решітках виникають області "стискання" й "розтягу" [22], які обумовлюють процеси деструкції в системі. Аналогічне зменшення швидкості зростання міцності зазначає ряд авторів для цементного тіста [19-21] й для гіпсу/бетону [23, 24].

Від точки "д", переважними стають процеси кристалізаційного структуроутворення.

На основі експериментальних даних зі співвідношень роботи [10] можна знайти швидкості хімічного зв'язування води I_{ξ} , кг/(кг·год), (рис. 8) й структуроутворення I_{η} , кг/(кг·год), (рис. 9) у часі.

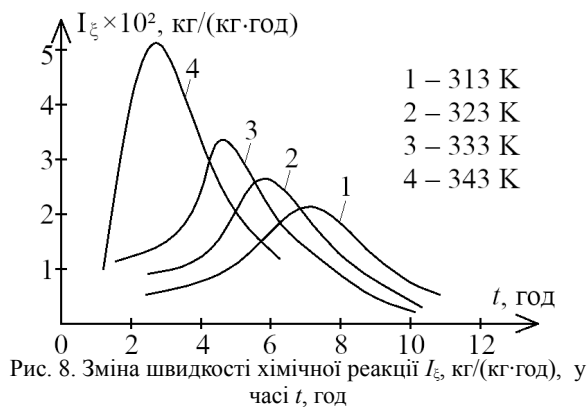


Рис. 8. Зміна швидкості хімічної реакції I_{ξ} , кг/(кг·год), у часі t , год

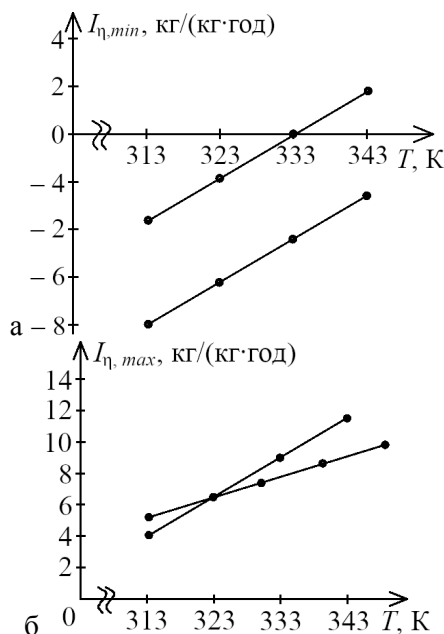


Рис. 9. Вплив температури на абсолютні величини екстремальних значень: а – для першого екстремуму; б – для другого екстремуму

Аналіз швидкості, кг/(кг·год), хімічного зв'язування води (рис. 8) та структуроутворення

(рис. 9) показує, що зміна температури справляє значний вплив як на процес структуроутворення, так і на процес хімічної реакції. Температурний фактор впливає на абсолютні величини й на час настання експериментальних значень I_{ξ} та I_{η} , кг/(кг·год).

При розгляді залежностей $I_{\xi} = f(\tau)$ (рис. 8) та $I_{\eta} = f(\tau)$ (рис. 9) можна помітити, що крива I_{η} розміщується як у додатній, так і у від'ємній областях. У той же час функція I_{ξ} (рис. 9) знаходиться тільки в додатній частині.

З підвищенням температури від 313 К до 333 К на кривих зміни швидкості хімічної реакції I_{ξ} спостерігається збільшення експериментальних значень у середньому на 20 % на кожні 10 К, а у діапазоні 333 К до 343 К – на 35 %. На час, год, настання максимуму функції I_{ξ} вплив температури також є суттєвим. Так, в інтервалі температури від 313 К до 333 К на кожні 10 К поява максимуму функції зсувається ліворуч на 1 год., а від 333 К до 343 К – на дві години. Темп зростання $I_{\xi,max}$ збільшуються з підвищенням температури, що відповідає [20].

Для розглянутого діапазону температури функції I_{η} двічі показують зменшення швидкості структуроутворення $\tau = 0...1$ год і $\tau = 2...5$ год. Це свідчить про те, що двічі відбувається часткове руйнування структури середовища. Час настання експериментальних значень відповідає розвитку деструктивних процесів на діаграмі вологісного стану (рис. 8).

Для двох періодів руйнування структури середовища характерним є те, що зі зменшенням температури швидкість руйнування зростає.

У першому випадку це можна пояснити тим, що зі зростанням температури швидкість структуроутворення більше – зростання в'язкості суміші превалює над зростанням тиску газу, зосередженого у цій суміші.

Підвищення температури від 313 К до 333 К викликає приріст абсолютної величини максимальних значень $I_{\eta,max}$ у чотири рази для першого випадку й два рази – для другого. Мінімум $I_{\eta,min}$ зменшуються відповідно у чотири та п'ять разів (рис. 9). Час настання максимуму швидкості структуроутворення $t_{\eta,max}$ скорочується з 1,5 до 0,75 год. для першого максимуму й з 6,5 год. до 5 год. – для другого.

При спільному розгляді (рис. 8 і 9) залежностей I_{ξ} і I_{η} , кг/(кг·год), необхідно зазначити, що мінімуми (другі) швидкості структуроутворення $I_{\eta,min}$ за часом відповідають максимумам швидкості хімічної реакції $I_{\xi,max}$, що свідчить про взаємозв'язок двох процесів. Зі збільшенням температури ізотермічної витри-

мки, К, скорочується період часу $\Delta t_{max,\eta\xi}$, год, між моментами досягнення максимальних значень швидкості, кг/(кг·год), хімічного зв'язування $I_{\xi,max}$ й структуроутворення $I_{\eta,min}$:

- при $T = 313$ К $\Delta t_{max,\eta} = 2,2$ год;
- при $T = 323$ К $\Delta t_{max,\eta} = 1,9$ год;
- при $T = 333$ К $\Delta t_{max,\eta} = 1,7$ год;
- при $T = 343$ К $\Delta t_{max,\eta} = 0,5$ год.

Найбільший збіг у часі настання $I_{\xi,max}$ та $I_{\eta,min}$, кг/(кг·год), спостерігається в інтервалі температури від 333 К до 343 К.

На основі викладеного вище у п. 2 дослідження можна зробити висновок про те, що аналіз процесу твердіння на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури, яка розвивається відповідно до умов навколишнього повітряного середовища, й оцінювати взаємодію хімічної реакції й процесу структуроутворення.

Виявлено п'ять ділянок на діаграмі вологісного стану, причому поява перших двох обумовлена для гіпсової/бетонної суміші безпосередньо процесом здимання цього середовища.

Отримані зміни швидкості структуроутворення дозволяють виявити й оцінити деструктивні процеси, які відбуваються під час здимання гіпсу/бетону і його твердіння.

Залежність реологічних параметрів середовища $\eta(\tau)$, Па·с, та $\tau_0(t)$, Па, може бути апроксимована експоненціальним законом

$$\eta(\tau) = \eta_0 e^{\bar{\alpha}\tau}, \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (24)$$

$$\tau_0(t) = \tau_0^o e^{\bar{\beta}t}, \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (25)$$

де η_0 і τ_0^o – відповідно, коефіцієнт пластичної в'язкості, Па·с, й граничне напруження зсуву, Па, у початковий момент часу $t=0$; $\bar{\alpha}$ й $\bar{\beta}$ – емпіричні коефіцієнти, год⁻¹, які залежать від складу суміші й умов структуроутворення.

Формули (24) й (25) повинні враховуватися при проведенні аналітичних і чисельних розрахунків за конкретною реологічною моделлю суміші (Кессона, Балклі-Гершеля) шляхом усереднення за часом. Саме такий підхід дозволяє лінеаризувати задачу підряду з застосуванням принципу квазістаціонарності.

Згідно з зазначеним принципом реологічні параметри приймаються незмінними протягом розглянутого періоду часу t_0 , год, й рівними своїм середнім значенням $\bar{\eta}$, Па·с, і $\bar{\tau}_0$, Па. Для обчислення цих значень застосовуються співвідношення

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{t_0} \eta(t) dt}{t_0} = \frac{\eta_0}{\bar{\alpha} t_0} (e^{\bar{\alpha} t_0} - 1), \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad (26)$$

$$\bar{\tau}_0 = \frac{\int_0^{t_0} \tau_0(t) dt}{t_0} = \frac{\tau_0^o}{\bar{\beta} t_0} (e^{\bar{\beta} t_0} - 1), \text{ Па}. \quad (27)$$

На підставі наведених моделей з'являється можливість оптимізувати роботу систем формування мікроклімату для забезпечення сприятливих умов при проведенні реставраційних робіт.

Висновки. Запропонована універсальна модель є корисною для побудови уніфікованих інженерних розрахунків твердіння пасто- й рідиноподібних елементів музейних експонатів. Запропонована низка конкретних рівнянь, а також ряд рівнянь більш загальної форми, які дозволяють описувати реологічну поведінку нелінійних рідин і пластиків при стаціонарному варіанті зсувної течії. Аналіз процесу твердіння на основі діаграми вологісного стану дозволяє фіксувати структурний стан капілярно-пористої структури, яка розвивається, й оцінювати взаємодію хімічної реакції й процесу структуроутворення.

Література

1. Гуськов К.П. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов, Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Л.Н. Лунин. – Москва, 1970. – 206 с.
2. Блох Л.С. Практическая номография / Л.С. Блох. – Москва: Высшая школа, 1971. – 328 с.
3. Файтельсон Л.А. Влияние вибраций на эффективную вязкость цементного теста / Л.А. Файтельсон, В.А. Бриедис. – В кн.: Теория формирования бетона. Научная сессия НИИЖБ / Под ред. Н.Е. Десова, И.Ф. Руденко, Москва, 1969. – С.89-101.
4. Белкин И.М. Ротационные приборы. Измерения вязкости и физико-механических характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов. – Москва: Машиностроение, 1968. – 272 с.
5. Шульман З. П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей / З.П. Шульман. – Москва: Энергия, 1975. – 352 с.
6. Волярович Н. П. О деформативных и прочностных свойствах концентрированных дисперсных систем /

- Воларович Н.П., Малинин Н.И. – Инженерно-физический журнал. 1966. – Т.10. – №6–С. 804-812.
7. Рейнер М. Реология / М. Рейнер. – Москва: Наука, 1965. – 224 с.
 8. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости / У. Л. Уилкинсон. – Москва: Мир, 1964. – 216 с.
 9. Chang C.C. Unified rheological relation of non-newtonian fluids / C.C. Chang, P. Ramanaiah // *Physics of Fluids*. 1961. – Vol. 4. – Iss. 9. – <https://doi.org/10.1063/1.1706466>
 10. Цимерманис Л.-Х.Б Термодинамический анализ твердения минерального вяжущего в закрытой системе / Л.Б. Цимерманис, Д.И. Штакельберг, А.Р. Генкин // VI Межд. конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – кн. 2. – С. 25 – 28.
 11. Цимерманис Л.-Х.Б. Потенциал оводнения и феноменологические уравнения переноса в капиллярно-пористых телах / Л.-Х.Б. Цимерманис // Инженерно-физические исследования строительных материалов. – Челябинск, 1976. – С. 3-12
 12. Цимерманис Л. Б. Потенциалографический метод исследования процессов твердения вяжущих / Л. Б.Цимерманис, А. Р.Генкин // Строительные материалы и бетоны. – Челябинск, ЮУКИ. – 1967. – С.31-42.
 13. Цимерманис Л. Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел / Л. Б.Цимерманис. – Челябинск, ЮУКИ. – 971. – 202 с.
 14. Генкин А. Р. Изменения влажностных характеристик структурообразующих систем на основе гидравлических вяжущих / А. Р. Генкин // Инженерно-физические исследования строительных материалов. – Челябинск, 1977. – С. 79-97.
 15. Куннос Г. Я. Элементы технологической механики ячеистых бетонов / Г. Я. Куннос, В. Х. Лапса, В. Х.Линденбергх, А. Б. Солодовник, А. Р. Штейнберг. – Рига: Зинатне, 1976. – 96 с.
 16. Дзенис В. В. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона / Дзенис В. В., Лайса В. Х.. – Ленинград: Стройиздат, 1971. – 112 с.
 17. Чистяков Б. З. Производство газобетонных изделий по резательной технологии / Б. З. Чистяков, И.А. Мысатов, В. И. Бочков. – Ленинград: Стройиздат, 1977. – 240 с.
 18. Сычев М. М. Твердения вяжущих веществ / М. М. Сычев. – Ленинград: Стройиздат, 1974. – 80с.
 19. Мчедлов-Петросян О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. Москва: Стройиздат, 1971. – 224 с.
 20. Горчаков Г. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков и др. – Москва: Стройиздат, 1976. – 144 с.
 21. Гранковский И. Г. О кинетике твердения минеральных вяжущих веществ / И. Г.Гранковский, Н. Н.Круглицкий // Доклады АН СССР. 1970 – Т. 194 – №1 – С.147-148.
 22. Бутт Ю. М. Портландцемент / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – Москва: Стройиздат, 1974. – 328 с.
 23. Книгина Г. И. Фактор структурообразования газобетонной массы при выдержке до автоклавирования / Г. И. Книгина, Л. В. Осипова, И. Н. Чернышев. – Изв. Вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – №4. – С. 82-85.
 24. Суткевич В. С. О прочностных и деформативных характеристиках ячеистобетонного сырца / В. С. Суткевич, А. Р. Штейнерт, В. Г. Хоромецкий // Технологическая механика бетона. – Рига: РПИ, 1976. – Вып. 1. – С.106-115.

References

1. Huskov K.P., Machikhin Yu.A., Machikhin S.A., Lunin L.N. *Teoriia pishchevykh mass*. 1970.
2. Blokh L.S. *Prakticheskaiia nomografiia*. 1971.
3. Faytelson L.A., Briyedis V.A. “Vliyanie vibratsii na effektivnuiu viazkost tsementnogo testa”. *Teoriia formirovaniia betona. Nauchnaia sessiia NIIZhB*. 1969. P. 89-101.
4. Belkin I.M., Vinogradov G.V., Leonov A.I. *Rotatsionnyie pribory. Izmereniia viazkosti i fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik materialov*. Mashinostroenie, 1968.
5. Shulman Z.P. *Konvektivnyi teplomassoperenos reologicheskii slozhnykh zhidkosti*. Energiia. 1975.
6. Volarovich N.P., Malinin N.I. “O deformativnykh i prochnostnykh svoistvakh kontsentrirrovannykh dispersnykh sistem”. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1966. №10. P. 804-812.
7. Reyner M. *Reologiiia*. Mir. 1965.
8. Uilkinson U.L. *Neniutonovskie zhidkosti*. Mir. 1964.
9. Chang C.C., Ramanaiah P. “Unified rheological relation of non-Newtonian fluids”. *Physics of Fluids*. 1961. V.4. No.9.
10. Tsimermanis L.B., Shtakelberg D.I., Genkin A.R. “Termodinamicheskii analiz tverdeniia mineralnogo viazhushchego v zakrytoi sisteme”. *VI MKKhTs*. 1976. T.2. kn.1. P. 25-28.
11. Tsimermanis L.B. *Potentsial ovodneniia i fenomenologicheskii uravneniia perenosa v kapilliarno-poristykh telakh*. – V kn.: *Inzhenerno-fizicheskiye issledovaniya stroitelnykh materialov*. Chelyabinsk. 1976. S.3-12.
12. Tsimermanis L.B., Genkin A.R. “Potentsialograficheskii metod issledovaniia protsessov tverdeniia viazhushchikh”. *Stroitelnyye materialy i betony*. YuUKI. 1967. P. 31-42.

13. Tsimermanis L.B. *Termodinamicheskie i perenosnye svoistva kapilliarno-poristykh tel*. YuUKI. 1971.
14. Genkin A.R. "Izmeneniia vlazhnostnykh kharakteristik strukturoobrazuiushchikh sistem na osnove gidravlicheskiikh viazhushchikh". *Inzhenerno-fizicheskie issledovaniia stroitelnykh materialov*. Cheliabinsk. 1977. P. 79-97.
15. Kunnos G. Ya., Lapsa V. Kh., Lindenberg B. Ya., Solodovnik A. B., Shteynbert A. R. *Elementy tekhnologicheskoi mekhaniki yacheistykh betonov*. Zinatne. 1976.
16. Dzenis V. V., Laysa V. Kh. *Ultrazvukovoi kontrol tverdeiushchego betona*. Stroyizdat. 1971.
17. Chistyakov B. Z., Mysatov I. A., Bochkov V. I. *Proizvodstvo gazobetonnykh izdelii po rezatelnoi tekhnologii*. Stroyizdat. 1977.
18. Sychev M. M. *Tverdeniia viazhushchikh veshchestv*. Stroyizdat. 1974.
19. Mchedlov-Petrosian O. P. *Khimiia neorganicheskikh stroitelnykh materialov*. Stroyizdat. 1971.
20. Gorchakov G. I. *Sostav. struktura i svoistva tsementnykh betonov*. Stroyizdat. 1976.
21. Grankovskii I. G., Kruglitskii N. N. "O kinetike tverdeniia mineralnykh viazhushchikh veshchestv". *Doklady AN SSSR*. 1970. T. 194. №1. P.147-148.
22. Butt Yu. M., Timashev V. V. *Portlandsement*. Stroyizdat. 1974.
23. Knigina G. I., Osipova L. V., Chernyshev I. N. "Faktor strukturoobrazovaniia gazobetonnoi massy pri vyderzhke do avtoklavirovaniia". *Izv. Vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura*. 1969. №4. P. 82-85.
24. Sutkevich V. S., Shteynert A. R., Khorometskiy V. G. "O prochnostnykh i deformativnykh kharakteristikakh yacheistobetonogo syrtsa". *Tekhnologicheskaya mekhanika betona*. RPI. 1976. Vyp. 1. P.106-115.

УДК 536.7:539.57

Термодинамический анализ твердения пасто- и жидкоподобных элементов музейных экспонатов под влиянием микроклиматических условий помещения

В.Б. Довгалюк¹, Ю.В. Човнюк², В.Т. Кравчук³, А.С. Москвитина⁴, М.О. Шишина⁵

¹д.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

²к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, vtk1@ukr.net

⁴асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

Аннотация. Процесс реставрации музейных экспонатов связан с формированием различных структурных сред, например, высыхания слоев красок, лаков и твердения гипсовых, бетонных растворов при реставрации статуй, элементов декора помещений. Механика таких сред характеризуется спектрами вязких, пластичных и упругих свойств в различных их сочетаниях. На формирование этих сред влияют микроклиматические условия помещений, в которых происходят эти процессы. Изучение и управление процессом структурообразования для получения среды с заданными свойствами является важной технологической задачей, которая решается, в частности, и системами формирования микроклимата. Изменение структурного состояния твердеющей среды может быть оценено по соответствующим изменениям пластической и обычной механической прочности, степени гидратации, тепловыделения, модуля упругости и др. В данной работе под структурообразованием понимается процесс, в результате которого характеристики материала приближаются к характеристикам соответствующего капиллярно-пористого тела (КПТ). Основным параметром, который определяет это приближение, является степень завершения структурообразования. Анализ процесса твердения рассматриваемых пасто- и жидкоподобных сред в зависимости от состояния воздушной среды на основе диаграммы влажностного состояния позволяет фиксировать структурное состояние капиллярно-пористой структуры указанных сред и оценивать взаимодействие химических реакций и процесса структурообразования, а полученные изменения скорости структурообразования - выявлять и оценивать деструктивные процессы, которые происходят при твердении вещества.

Ключевые слова: термодинамический анализ, структурообразование, консистентность, твердение, пасто- и жидкообразные среды, характеристики, капиллярно-пористые тела.

UDC 536.7:539.57

Thermodynamic Analysis of Hardening Paste- and Liquid-Like Elements of Museum Exhibits under the Influence of Microclimatic Conditions in a Room

V. Dovhaliuk¹, Y. Chovniuk², V. Kravchuk³, A. Moskvitina⁴, M. Shyshyna⁵

¹ Dr. Hab., professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, 2280170@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4836-5354

² PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, yhovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

³ PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine, vtk1@ukr.net

⁴ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁵ Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, shyshyna.mo@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0001-9384-7662

Abstract. The process of restoration of museum exhibits is associated with the forming of various structural media, for example, drying of paints layers, varnishes and hardening of gypsum and concrete solutions during the restoration of statues, elements of room decor. The mechanics of such media is characterized by spectra of viscous, plastic and elastic properties in their various combinations. The forming of these substances is influenced by the microclimatic conditions of the premises, in which these processes take place. In technological operations, as a rule, large shear deformations take place, which greatly exceed the elastic limit. Thus, the most significant for technological calculations are viscoplastic properties, which reflect the relationship between the existing shear stresses and the rate of irreversible shear deformation. For a qualitative description of this relationship, it is customary to use consistency curves that relate shear stresses to the rate of irreversible shear deformation or the dependence of the effective viscosity on the rate of irreversible shear deformation. Structure formation is one of the main processes in the technology of processing solidifying paste-like and liquid-like media when their characteristics approach those inherent in the corresponding capillary-porous bodies. The properties of such media depend on the type and nature of the structure. The study and control of the process of structure formation to obtain a medium with desired properties is an important technological task, which can be solved, in particular, by microclimate systems. The change in the structural state of the solidifying medium can be estimated from the corresponding changes in plastic and conventional mechanical strength, degree of hydration, heat release, elastic modulus, etc. In this work, structure formation is understood as a process, as a result of which the characteristics of the material approach the characteristics of the corresponding capillary-porous body (CPB). The main parameter that determines this approximation is the degree of completeness of structure formation. Analysis of the hardening process of the considered pasty and liquid-like media on the basis of the moisture state diagram makes it possible to fix the structural state of the capillary-porous structure of these media and to evaluate the interaction of chemical reactions and the process of structure formation. And the resulting changes in the rate of structure formation allows to identify and evaluate the destructive processes that occur during solidification of the substance.

Keywords: thermodynamic analysis, structure formation, consistency, hardening, paste- and liquid-like media, characteristics, capillary-porous bodies.

Надійшла до редакції / Received 10.09.2020

ВІДЦЕНТРОВІ ДАХОВІ ВЕНТИЛЯТОРИ

ВЕНТС ВКВ ВЕНТС ВКГ



Продуктивність – до **17010** м³/год
з вертикальним або горизонтальним викиданням повітря

Для витяжної вентиляції
приміщень різного
призначення

Підходять для дахів
будь-якого типу,
а також вертикальних
вентиляційних шахт

Двигун оснащений
вбудованим
тепловим захистом
з автоматичним
перезапуском

УДК 622.807:622.235.3

Розробка ефективних способів і засобів нормалізації атмосфери робочих зон кар'єрів

В. Г. Наливайко¹, В. А. Коновалюк²

¹к.т.н., доц. Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна, vadim.moris@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4452-6111

²к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, viktoria.konovalyuk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5115-7188

***Анотація.** У результаті натурних досліджень стану повітряного середовища наявних кар'єрів отримано залежності зміни концентрацій оксиду вуглецю зі збільшенням глибини кар'єру. Встановлено недостатній повітрообмін з навколишнім середовищем під час штилів та температурної інверсії. Розрахунково-аналітичними й експериментальними дослідженнями встановлено, що для інтенсифікації повітрообміну в глибокому кар'єрі доцільні установки імпульсного зрошення за допомогою дрібнодисперсного аерозолу. Для поліпшення умов праці була розроблена установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення ІДДЗ (водяна гармата). При її пострілі вода розпилюється в горизонтальному напрямку. Досліджувалась ефективність роботи установок з різними характеристиками: велика гармата (дальність польоту струменя – 200 м, об'єм води, що викидається за цикл, – 1000 дм³) та мала гармата (дальність польоту струменя – 100 м, обсяг води, що викидається за цикл – 200 дм³). Результати експерименту свідчать, що для провітрювання й очищення повітря в запиленому об'ємі атмосфери нижніх горизонтів глибоких кар'єрів більшу ефективність має застосування великої гармати. Кількість установок вибирається з умов потреби зрошувальної рідини для ефективного провітрювання застійної зони або із умов інтенсивності пилота газовиділення на цій ділянці. Установка ІДДЗ у період між вибухами та інтенсифікацією повітрообміну в кар'єрі може бути використана для боротьби з пилом, що вихає в атмосфері кар'єру, та на прилеглий території. Особливо це стосується вузлів концентрації гірничого і транспортного устаткування на горизонтах кар'єру (перевантажувальні майданчики, застійні зони в тупикових вибоях, при проходці траншей тощо). Застосування установок ІДДЗ дозволить виконувати внутрішньокар'єрні технологічні роботи на глибині понад 500 м із застосуванням автотранспортної доставки руди на перевантажувальні пункти циклічно-поточної технології.*

***Ключові слова:** провітрювання, загазованість, атмосфера кар'єру, вітровий потік, імпульсна установка*

Вступ. У зв'язку зі збільшенням глибини кар'єрів однією з головних проблем при розробці родовищ відкритим способом є забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов у атмосфері кар'єрів, здатних гарантувати безпечно і високопродуктивну роботу.

На сьогодні широко застосовуються заходи боротьби з запиленістю і загазованістю. Однак, в останні роки при проведенні відкритих гірничих робіт частішали випадки наявності підвищеного вмісту шкідливих домішок в атмосфері кар'єрів. Основними причинами наднормативного забруднення атмосфери кар'єрів є недосконалість технологічних процесів і обладнання та погіршення умов природного повітрообміну зі збільшенням глибини кар'єрів, особливо при штилі і температурній інверсії.

Постійне збільшення обсягів, інтенсивності та глибини гірничих робіт в поєднанні з такими метеорологічними чинниками як температурна інверсія і штиль створює несприятливі умови праці. Ці фактори утруднюють турбулентний повітрообмін виробленого простору кар'єру з навколишнім середовищем.

У результаті виникає наднормативне забруднення атмосфери кар'єру. Для своєчасного вжиття заходів, що забезпечують безпеку персоналу кар'єру і, як наслідок, виробниче функціонування, необхідна методика точного прогнозування параметрів атмосфери, ефективні способи провітрювання і надійні технічні пристрої.

Склад атмосфери в робочих зонах глибоких кар'єрів потребує нормалізації внаслідок забруднення відпрацьованими газами силових установок кар'єрної техніки поряд з високим рівнем запиленості. На сьогодні спостерігаються такі загальні тенденції розвитку гірничої справи:

- поглиблення кар'єрів;
- підвищення продуктивності кар'єрного транспорту;
- збільшення потужності силових установок.

Отже, проблема провітрювання глибоких кар'єрів загострюється.

Несприятливі метеоумови (поєднання штилів з інверсіями) негативно впливають на екологічну ситуацію повітряного басейну кар'єру. Вимушені прості багатьох наявних

кар'єрів унаслідок перевищення гранично-допустимої концентрації (ГДК) забруднювальних речовин у складі їхньої атмосфери досягають 25 % часу.

Відповідно до вимог Єдиних правил безпеки (ЄПБ) при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом у разі перевищення нормативного вмісту шкідливих газів або запиленості повинні вживатися заходи щодо забезпечення безпечних і здорових умов праці.

Інтенсивність більшості джерел пиловиділення в кар'єрі залежить від багатьох факторів, серед яких швидкість, м/с, і температура, °С, повітря в зоні обладнання, що працює. Змінну інтенсивність виділення шкідливих домішок, яка залежить від зовнішніх умов, мають усі машини і пристрої, що пересипають гірську масу в потоці рухомого повітря, а також автомобілі, бульдозери та ін.

Надходження пилу й газів до атмосфери кар'єрів і навколишнього середовища тісно взаємопов'язано між собою і визначається одним і тим комплексом некерованих і керованих факторів. Результати експериментальних досліджень показують, що до головних некерованих факторів належать:

- кліматичні умови;
- вітровий режим кар'єру;
- термічний режим кар'єру;
- гірничо-геологічна характеристика родовища.

Керованими факторами є технологія, техніка і організація гірничого виробництва.

Причиною сильного, але короткочасного забруднення атмосфери кар'єру і прилегло району є вибухові роботи. Газопилова хмара при потужному масовому вибуху викидається на висоту 150...250 м. Після досягнення рівня конвекції вона поширюється за вітром на значні відстані. Об'єм пилогозової хмари становить 15...20 млн. м³, а концентрація пилу досягає в ньому 4000 мг/м³. При вибухах виділяються також значні об'єми отруйних газів – в основному окис вуглецю й оксиди азоту. Кількість газів залежить від типу вибухової речовини і властивостей порід, що підриваються.

Інтенсивним і постійним джерелом забруднення повітря в кар'єрах є автотранспорт. Вихлопні гази двигунів внутрішнього згорання є складною багатокомпонентною сумішшю. В даний час у їхньому складі визначається вже більше 200 різних речовин. З аерозольних компонентів найбільш небезпечна сажа, що викидається у вигляді частинок з переважним розміром 0,05...0,5 мкм. Частки сажі, мають значну питому поверхню – до 75м²/г. Вони

адсорбують канцерогенні та інші токсичні речовини, які при потраплянні в організм людини можуть призвести до тяжких наслідків. Склад токсичних викидів кар'єрних автомобілів значною мірою залежить від режиму роботи двигуна та характеристики траси.

Останні дослідження та публікації. Проблема нормалізації атмосфери кар'єрів виникла в кінці п'ятидесятих – на початку шістдесятих років минулого століття з поглиблення ряду кар'єрів понад 100...150 м. Однією з перших робіт, присвячених вентиляції кар'єрів, була робота член-кореспондента української академії наук Ф. А. Абрамова, опублікована в 1957 році [1]. З кінця 1950-х і до кінця 1970-х років ішли інтенсивні теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на поліпшення природного провітрювання і розробку засобів і способів штучної вентиляції кар'єрів [2].

Головною стратегічною помилкою більшості дослідників були спроби за допомогою окремих установок провітрити непорівнянні за необхідними потужностями об'єми виробленого простору кар'єрів. Для цього використовувались окремі установки місцевого провітрювання типу УМП [3] та теплові установки УТСМ, які в періоди глибоких інверсій ставали додатковим джерелом забруднення атмосфери. При цьому проблема нормалізації санітарно-гігієнічних параметрів атмосфери глибокого кар'єру так і не була вирішена.

Зусилля дослідників були спрямовані, в першу чергу, на пошук шляхів локальної зміни метеорологічних параметрів атмосфери кар'єру за допомогою різних технічних пристроїв, призначених для відновлення або інтенсифікації повітрообміну з навколишнім середовищем. Більшість технічних рішень не пішла далі стадії теоретичних досліджень, окремі вийшли на рівень експериментів, але жодне не застосовується широко на практиці.

Певних успіхів досягла Школа кар'єрних аерологів, створена докторами технічних наук, професорами К. В. Кочневим і С. С. Філатовим в «Інституті гірничої справи Міністерства чорної металургії СРСР». Дослідники цієї школи на підставі аналізу багаторічних досліджень показали необхідність створення систем вентиляції та пилогозаподавлення на базі потужних турбовентиляторів – генераторів штучних опадів. Ця ідея була успішно реалізована в кінці 1970-х – на початку 1980-х років на урановидобувних кар'єрах гірничо-хімічних комбінатів з використанням турбовентиляторів НК-12КВ [4, 5].

Повітрообмін виробленого простору з навколишнім середовищем є необхідною умовою підтримки санітарно-гігієнічних параметрів атмосфери кар'єру на нормативному рівні. Це дозволяє видалити забруднене повітря за його межі. З ростом глибини кар'єра цей процес набуває циклічного характеру, що залежить від інтенсивності провітрювання виробленого простору природними вітровими потоками. При такому характері повітрообміну забруднене повітря з кар'єру може:

- виноситися повністю – турбулентний повітрообмін);
- виноситися частково – рециркуляційний повітрообмін;
- не виноситися взагалі – припинення повітрообміну).

Загальнообмінна вентиляція кар'єру вимагає великих витрат енергії і практично не застосовується при відпрацюванні глибоких кар'єрів.

В. Н. Ситенков [6] зробив висновок про недоцільність штучного провітрювання кар'єру. Цей висновок справедливий за умови несумірності енергії руйнування інверсії ($10^8 \dots 10^{12}$ Дж) і енергії повітряної струмини ($10^5 \dots 10^7$ Дж), що створюється найсучаснішими вентиляторними установками типу АВК-5, ПВУ-6 та ін. Такі установки реалізують квазі-статистичний режим провітрювання.

Як випливає з наведеного вище, для вирішення проблеми провітрювання необхідні високоенергетичні установки, серед яких засновані на використанні енергії вибуху. На основі цього постулату пропонується використання саме енергії вибуху [7-9].

Сутність ідеї полягає у формуванні висхідного газового струменя каскадним вибухом паливо-повітряної суміші. Ефективність ідеї обумовлюється наступними факторами: каскадністю вибухів; високою енергоємністю паливо-повітряної суміші; мінімальним впливом на навколишнє середовище. В цілому, можна стверджувати про перспективний напрямок в аерології кар'єрів, якщо розширити дослідження, описані в роботі Н. З. Бітколова [10].

Запропонований спосіб дозволяє реалізувати імпульсний режим вентиляції при потужності струменя повітря, що виноситься, понад 10^{10} Вт і при масі палива, що підривається, 30 т. У цей же час, аналогічні за потужністю стаціонарні пристрої не перевищують величини 10^7 Вт.

Технологія імпульсного струминного провітрювання глибоких кар'єрів наведена в роботі [11]. У ній представлено результати роз-

рахунків каскадних вибухів паливо-повітряних сумішей для малих мас палива і в умовах інверсної атмосфери кар'єру.

У роботі [12] як результат чисельного моделювання продемонстрована можливість провітрювання кар'єру за допомогою вентиляційних підняткових і штолень. Застосування цих способів дозволяє істотно змінити структуру швидкісних полів і забезпечити винесення шкідливих домішок з кар'єрного простору за більш короткий час порівняно з базовим варіантом. При цьому використання вентиляційних підняткових більш доцільне, ніж штолень.

Спосіб провітрювання за допомогою гірничих виробок, як і технологія імпульсного струминного провітрювання, до теперішнього часу не знайшов широкого використання на вітчизняних кар'єрах в зв'язку зі значними витратами на спорудження системи. Очевидно, що цей спосіб не буде застосовуватися для загальнокар'єрної вентиляції, особливо для кар'єрів великих об'ємів.

Систематичні дослідження проблеми створення безпечного повітряного середовища в кар'єрах в «Гірничому інституті Кольського наукового центру Російської академії наук» почалися з 1977 року. При цьому спочатку довелося йти традиційними методами натурних спостережень і виробничих експериментів через відсутність необхідного досвіду й експериментальної бази. На основі отриманих даних і аналітичних досліджень було розроблено метод визначення оптимальних параметрів установок, що створюють штучні струмини, з урахуванням взаємодії їх з температурно-стратифікованою атмосферою.

Штучне провітрювання для нормалізації атмосфери в об'ємі кар'єрного простору (загальнообмінне штучне провітрювання кар'єру) при забрудненні його техногенними газовими домішками на практиці виявилось малоефективним. Узагальнення досвіду спостережень за процесами, що відбуваються в приземному шарі атмосфери, чисельні експерименти за розробленими математичними моделями, енергетична оцінка цих процесів і їхньої взаємодії з штучними вільними струминами дозволили обґрунтувати нову для аерології кар'єрів концепцію [13, 14]. Сене її в тому, що штучні вільні струмини створюють циркуляційні зони. У їхньому об'ємі відбувається швидко усереднення концентрації і накопичення в них шкідливих домішок без істотного виносу їх за межі зони. Тому для нормалізації кар'єрної атмосфери при штилі і температурних інверсіях потрібна вели-

ка кількість енергії, яка на 3...4 порядки вище не лише потужності кар'єрних вентиляторів, але і потреби кар'єру в електричній енергії.

Тому проблема створення нормалізованих санітарно-гігієнічних умов методом штучної вентиляції в загальному випадку вирішена бути не може.

На основі проведеної соціально-економічної оцінки було визначено реально можливі шляхи вирішення проблеми в глибоких кар'єрах шляхом забезпечення безпечного повітряного середовища безпосередньо на робочому місці або в локальних робочих зонах кар'єру з підвищеною концентрацією шкідливих речовин.

На підставі аналізу проведених досліджень і виробничих даних встановлено, що в кар'єрах Криворізького басейну за певних метеорологічних умов (наприклад, при швидкості вітру на поверхні до 3 м/с) вплив вітрової енергії на повітрообмін в нижніх горизонтах кар'єрів недостатній. Тому необхідне здійснення ряду заходів щодо оздоровлення атмосфери.

Досліджувалась ефективність застосування рідких компонентів для пилогазоподавлення та інтенсифікації повітрообміну в кар'єрі. Промислові експерименти [15] показали також, що при поширенні повітряно-газо-рідинних струмін у кар'єрному просторі відбувається інтенсивне (до 50%) випаровування води. При цьому процеси, що спостерігаються в атмосфері зони, яка обслуговується, аналогічні процесам, що протікають в апаратах для кондиціонування повітря з застосуванням води.

Аналіз експериментів на кар'єрі показав, що при роботі вентилятора НК 12КВ відбувається зміна як відносної вологості ϕ на 10-15 %, так і температури повітря T на 2...4 К. Якщо час обробки τ не перевищував 30-40 хв, то швидкість зміни температури $dT/d\tau$, К/хв і відносної вологості $d\phi/d\tau$, %/хв, набували хід на рівнях, що відрізняються від природних. Так, швидкість $dT/d\tau$ встановлювалася на рівні 1,5...2,5 К/хв нижче, а $d\phi/d\tau$ – на 5...12 %/хв вище порівняно з природним ходом.

Якщо час обробки зростає до 60 хв, то $d\phi/d\tau$ збільшувалась у 2 рази, а $dT/d\tau$ – у 4 рази, в порівнянні з природною зміною параметрів повітряного середовища.

У роботі [16] стверджується, що найбільш ефективним способом подавлення пилу, який виноситься з кар'єру, є створення тонкодисперсних водяних завіс у формі туману.

Як впливає зі сказаного вище, для вирішення проблеми провітрювання необхідні високоенергетичні установки, серед яких

засновані на використанні енергії фазових переходів. На основі цього постулату пропонується використання енергії фазових переходів дрібнодисперсного аерозолу методом його диспергування за допомогою дошувальних установок імпульсної дії [17,18,19].

Сутність ідеї полягає у формуванні дрібнодисперсного водяного струменя імпульсним способом за допомогою установки циклічної дії, здатної доставити дрібнодисперсний аерозоль фракцією 0.1...0.5 мм на відстань до 200 м. Ефективність ідеї визначається наступними факторами: циклічністю викидів; високою енергоємністю; мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Для підтвердження здійсненності принципово нового способу провітрювання проведені експерименти [18] і чисельні розрахунки [20]. Показано, що новий метод провітрювання локальних зон кар'єрів, заснований на дрібнодисперсному зрошенні локальної забрудненої ділянки кар'єру, дозволяє в кілька разів збільшити ефективність провітрювання цієї зони порівняно з наявними способами вентиляції. Повне відновлення чистого повітряного середовища відбувається за 1...1,5 год роботи імпульсних установок.

Проведена оцінка енергетичної ефективності застосування способів інтенсифікації повітрообміну в атмосфері кар'єру.

Практичне застосування мають два способи зволоження повітря: ізотермічний і адіабатичний. Адіабатичне зволоження є набагато більш економічним, оскільки процес пароутворення відбувається за рахунок внутрішніх джерел енергії, а зовнішнє енергоспоживання пов'язано тільки з подоланням сил поверхневого натягу води в ході її розпилення. Генерація 10 кг вологи вимагає в цьому випадку 0,7 кВт·год електроенергії.

Формулювання цілей статті. Задачею дослідження є пошук обґрунтованих технічних рішень для ефективного повітрообміну в просторі глибоких кар'єрів на основі фазових перетворень рідин у нижніх шарах атмосфери робочих зон кар'єру зі створенням позитивного або негативного градієнта температури, задля інтенсифікації циркуляції більш теплого або холодного повітря.

Основна частина. Наявні глибокі кар'єри є недосконалою аеродинамічною системою, яка не дозволяє в ряді випадків ефективно здійснювати повітрообмін у нижніх горизонтах за рахунок природного провітрювання.

Кар'єр як об'єкт провітрювання не має аналогів у світовій виробничій практиці і є

новим етапом розвитку вентиляції. Відбувається перехід від провітрювання закритих систем (цехів, підземних рудників, шахт і т. ін) до відкритих (кар'єрів, розрізів) з нестійкими складними процесами і зв'язками.

Під системою в даному випадку розуміють частину атмосфери в об'ємі кар'єра, у якій чистоту повітря необхідно підтримувати на заданому рівні. Відкрита система тісно пов'язана з навколишнім середовищем. У даному випадку неможливо виділити чітку межу між ними в атмосфері.

Зазвичай прийнято відносити до навколишнього середовища зовнішні відносно системи об'єкти і впливи, які беруть участь у формуванні його властивостей. На відміну від непроникних меж – борти і дно кар'єру, – межа між системою (атмосферою кар'єру) і навколишнім середовищем проходить в атмосфері і є проникною. Вона виражена нечітко і має гіпотетичний характер.

Межею системи можна назвати проникну поверхню об'єму кар'єру, пов'язану з атмосферою навколишнього середовища, яка відокремлює цей об'єм від неї. Якщо мова йде про робочу зону кар'єру, то межа буде умовно відокремлювати цю зону від решти атмосфери кар'єру.

Необхідною умовою провітрювання (вентиляції) будь-якої системи є потоки маси повітря крізь її межі. При цьому потоки зовнішнього і стоки забрудненого повітря повинні бути розосереджені так, щоб унеможливити «коротке замикання» між собою (рециркуляцію забрудненого повітря).

Таким чином, за умовами сполучення з навколишнім середовищем і розподілу повітря всередині об'єму кар'єру відкрита система непорівнянна із закритою. Це призводить до особливого підходу до оцінки впливових факторів. При стійкому стані атмосфери необхідно створити в кар'єрі конвективний рух і забезпечити обмін повітряних мас із зовнішнім середовищем.

Для поліпшення умов праці за газопиловим фактором на нижніх горизонтах глибоких кар'єрів була розроблена водяна гармата. Виконано аналіз ефективності застосування водяної гармати для провітрювання нижніх горизонтів глибоких кар'єрів.

При пострілі водяної гармати проводиться розпилення води вздовж деякого горизонтального напрямку. З плином часу гармата повертається. Віяло таких напрямків утворює горизонтальну площину. Процес носить коливальний і циклічний характер, як у просторі,

так і за часом. Для спрощення вважається, що вода рівномірно розподіляється за площиною, і процес є стаціонарним. Це дозволить визначити середні показники реального процесу.

Вільна конвекція, що виникає в атмосфері при нестійкій стратифікації, має свої особливості. Вона відрізняється від конвективних потоків, створених компактними тепловими джерелами. При нестійкій стратифікації немає спрямованого руху повітря. Весь простір розбивається на струминки холодного повітря, що рухаються вниз, і струминки теплого повітря, які підіймаються вгору. Тепломасообмін у такому просторі описується шляхом підбору коефіцієнта турбулентної дифузії.

За просторовими змінними завдання розглядається в одновимірній постановці вздовж вертикальної координати z , м. Це можна обґрунтувати тим, що фізичні умови, які впливають на поширення шкідливих речовин, слабо змінюються в горизонтальному напрямку. Припущення одновимірності, крім того, породжує умова повного відбиття шкідливих речовин стінками кар'єру. Це найгірший випадок з точки зору провітрювання.

Проведені дослідження щодо визначення оптимального діаметра крапель. Після пострілу водяної гармати в водоповітряній суміші починається випаровування води. Відносна вологість повітря, %, зростає, а температура, К, падає. Процес триває, доки не випаруються всі краплі чи не утвориться рівновага води і водяної пари, тобто за відносної вологості 100 %. У зайнятому сумішшю об'ємі повітря виникає область зниженої температури, К. Вона утворюється під водоповітряним шаром за рахунок гравітаційного осідання крапель. При термодинамічному аналізі ця область має чітко окреслені межі. За рахунок вертикального тепломасообміну горизонтальні фронти розмиваються, що призводить до зменшення вертикального температурного градієнта і до зниження якості провітрювання.

Визначений діапазон зміни температури, К, і вологості повітря, %, в локальній зоні кар'єру від часу роботи установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення (табл. 1, 2 і рис. 1). Отже, через певний час відносна вологість у горизонтальному шарі, що займає приблизно половину висоти кар'єру, досягає 100 % (для великої гармати - через 18 хв, для малої - через 30 хв).

У наступні моменти часу краплі будуть просто «пролітати» крізь шар без змін. Процес випаровування, аналогічний початковому, буде відбуватися в нижній половині кар'єру.

Таблиця 1

Параметри повітря після пострілу великої гармати дальністю польоту струменя 200 м, об'єм води, що викидається за цикл, 1000 дм³

Час, хв	Зміна температури, °С	Зміна вологості, %
1,12	-0,93	2,14
1,99	-1,65	3,88
5,11	-4,22	10,82
10,02	-8,25	24,47
15,15	-12,43	44,12
16,18	-13,27	48,99
18,71	-15,32	62,83

Таблиця 2

Параметри повітря після пострілу малої гармати дальністю польоту струменя 100 м, об'єм води, що викидається за цикл, - 200 дм³

Час, хв	Зміна температури, °С	Зміна вологості, %
1,11	-0,51	1,17
1,97	-0,90	2,08
4,91	-2,26	5,42
10,04	-4,61	11,95
15,17	-6,95	19,61
19,98	-9,13	28,06
25,10	-11,45	38,85
28,63	-13,04	47,64

Звідси випливає висновок, що через деякий час (у разі великої гармати – через 36 хв, малої – через 60 хв) відносна вологість повітря у всьому повітряному просторі нижче рівня гармати досягне 100%. Температура встановиться постійна, і стратифікація стане байдужою.

Оптимальним часом роботи гармати слід вважати 18 хвилин для великої і 30 хвилин для малої. Ці значення залишаться справедливими і при врахуванні вертикального тепломасообміну, хоча перепад температури 13 К не буде досягатися.

Таким чином, проведене дослідження дозволило оцінити максимальний перепад температури, К, який може бути досягнутий, і необхідний для цього час (який прийнято за оптимальний). Крім того, тривала робота водяної гармати є неефективною.

Одним із шляхів зниження енерговитрат на установки для інтенсифікації повітрообміну внутрішньокар'єрного простору може бути застосування далекоструминних дощувальних установок [18].

На підставі проведених теоретичних розрахунків зроблено висновок, що використання установки імпульсного дрібнодисперсного

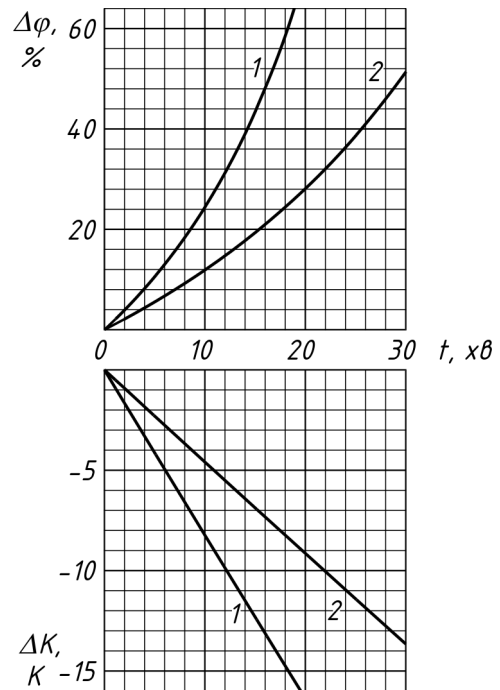


Рис. 1. Зміна відносної вологості $\Delta\phi$, %, та температури ΔT , К, повітря після пострілу гармати: 1 – великої, 2 – малої

зрошення можливо не тільки для локального пилогазоподавлення при масових вибухах, але і для інтенсифікації повітрообміну в робочих зонах кар'єру. При цьому на підставі теоретичних і модельних досліджень показано можливість використання установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення (ІДДЗ) з робочим об'ємом виплеску 200 дм³.

Разом з тим, засобів дрібнодисперсного імпульсного зрошення в даний час розроблено недостатньо. Практика ведення гірничих робіт у кар'єрах показує необхідність розробки більш потужних установок ІДДЗ.

Установка характеризується безмашинним перетворенням енергії. Вода в атмосферу витісняється газами, які утворюються при спалюванні стиснутої паливної суміші. Високі тиски виплеску отримуються при порівняно низьких питомих витратах енергії (0,26...0,3 г бензину, газу або іншого виду палива на літр води).

На основі обчислювального експерименту розглянуто тепломасообмін, що відбувається в атмосфері кар'єру під водоповітряним шаром при роботі великої і маленької гармат.

Для розрахунку турбулентного тепломасообміну з урахуванням вільної конвекції застосована програма «Слабосжимаемая жидкость» з пакету прикладних програм FlowVision. В ній використовується k - ϵ модель турбулентності для конвективних потоків повітря і рівняння конвективно-дифузійного переносу в наближенні Бусинеска для тепломасооб-

міну.

Для великої гармати вважаємо, що її далекобійності достатньо для того, щоб створити водоповітряний шар, який повністю покриває нижню частину кар'єру в плані. Тоді на верхній межі розрахункової області (водоповітряний шар) ставляться такі граничні умови: «Вільний вхід / вихід» для швидкості з тиском, рівним атмосферному (101000 Па); постійна температура 317,921 К (44,771 °С) і нульова концентрація СО (над шаром повітря вважається чистим).

Вважаємо, що в початковий момент часу (початкова умова) «повітря в області спокою», температура дорівнює 318,15 К (45 °С), і присутнє забруднення у вигляді чадного газу з концентрацією 10 ГДК (ГДК СО = 20 мг/м³).

Результати обчислювального експерименту для різних проміжків часу (рис. 2) дозволяють зробити висновок, що для очищення повітря в об'ємі атмосфери досить 40 хв.

При розгляді малої гармати (200 дм³) верхня гранична умова має бути поставлена інакше. Її далекобійності не вистачає для створення водоповітряного шару, що буде повністю покривати нижню частину кар'єру в плані. Верхня квадратна грань розрахункової області повинна бути розбита на дві прямокутні частини: водоповітряний шар і залишок. На частині верхньої межі, що відповідає водоповітряному шару, ставиться гранична умова, аналогічна попередньому пункту: «Вільний вхід / вихід» для швидкості з тиском, рівним атмосферному; постійна температура 318,023 К (44,873 °С) і нульова концентрація СО.

Результати обчислювального експерименту для різних проміжків часу (рис. 3) свідчать про те, що при роботі великої гармати конвективні потоки – хаотичні в просторі та за часом вертикальні струмини. Характер конвективних потоків при роботі малої гармати, навпаки, упорядкований. Помітно виникнення великої вихрової зони під водоповітряним шаром. У її центрі утворюється застійна зона. Це є причиною зниження якості провітрювання й появи області підвищеної концентрації забруднення (світло-зелена пляма на рис.4.3 д-ж).

Таким чином, результати обчислювального експерименту свідчать про більшу ефективність застосування великої водяної гармати порівняно з малою для провітрювання нижніх горизонтів глибоких кар'єрів. Для очищення повітря в запиленому об'ємі атмосфери під водоповітряним шаром (принаймні - в разі великої гармати) достатньо 40 хв її роботи.

Практичне застосування. Аналіз даних досліджень [21] показує, що при вологовмісті атмосферного повітря більше 9,3...9,5 г/кг у Первомайському і Ганнівському кар'єрах спостерігається стійке зменшення концентрації оксиду вуглецю зі збільшенням глибини розробки. Концентрація СО на нижчих горизонтах нижче, ніж на верхніх. При вологовмісті атмосферного повітря менше 5,4 г/кг на обох кар'єрах відбувається зростання концентрації оксиду вуглецю зі зниженням зони гірських робіт. Аналогічні залежності мають спостерігатися і в інших кар'єрах, оскільки ситуаційно-технологічні схеми відпрацювання і провітрювання схожі.

Отримані за даними натурних досліджень залежності зміни концентрації оксиду вуглецю зі збільшенням глибини кар'єру наочно показують, що при зміні густини повітря, кг/м³, за рахунок зміни його вологовмісту, г/кг, концентрація оксиду вуглецю за висотою кар'єру не є постійною величиною. При низькому вологовмісті повітря підвищення концентрації оксиду вуглецю спостерігається у верхніх шарах атмосфери кар'єра, а при високому вологовмісті – у нижній його частині.

Дослідження показують, що кар'єри протягом доби в усі сезони року провітрюються в основному силою вітрового потоку, тобто динамічна циркуляція повітря в кар'єрі спостерігається значно частіше, ніж теплова. У той же час, у нічні години вплив динамічного фактору слабшає, і у зв'язку з цим збільшується ймовірність утворення теплових, тобто конвективних і інверсійних схем провітрювання.

Одним з основних призначень установки імпульсного дрібнодисперсного зрошення є її використання для зниження пікових навантажень за викидами шкідливих речовин з кар'єрів в навколишнє середовище, а також для нормалізації складу атмосфери глибоких кар'єрів. Значні пікові викиди шкідливих домішок у кар'єрах відбуваються при масових вибухах і ситуаціях зі створенням внутрішньокар'єрних інверсійних зон.

Застосування установок імпульсного дрібнодисперсного зрошення дозволить виконувати внутрішньокар'єрні технологічні роботи на глибині понад 500 метрів із застосуванням автотранспортної системи доставки руди на перевантажувальні пункти циклічно-поточної технології. В іншому випадку, при ігноруванні розробки системи щодо нормалізації атмосфери робочих зон і ділянок у глибоких кар'єрах, все частіше буде спостеріга-

тися підвищення загазованості атмосфери кар'єру зі збільшенням часу і частоти простою.

Кількість установок вибирається із умови потреби зрошувальної рідини для ефективного провітрювання застійної зони або залежно від інтенсивності пило- та газовиділення на цій ділянці. Розрахунки слід проводити індивідуально для кожного кар'єру з урахуванням:

- географічного розташування;
- впливу рози вітрів;
- наявності додаткових факторів, що впливають на повітрообмін і виділення шкідливостей в атмосферу кар'єру.

Установка імпульсного дрібнодисперсного зрошення в період між вибухами та інтенсифікацією повітрообміну в кар'єрі може бути використана для боротьби з пилом, що витає в атмосфері кар'єру та прилеглий території. Особливо це стосується вузлів концентрації гірничого і транспортного устаткування на горизонтах кар'єру (перевантажувальні майданчики, застійні зони в тупикових вибоях, при проходці траншей тощо).

Режим роботи установки, що використовується при придушенні пилу, який витає, повинен бути повторно-короткочасним [22]. Так, увімкнення установки здійснюється після того, як концентрація пилу або газів у зазначених місцях кар'єру стає вище гранично-допустимої. Після декількох залпів установки концентрація пилу повинна знизитися до заданої величини (наприклад, до 1 мг/м^3 при ГДК 2 мг/м^3). Потім робота установки припиняється і відновлюється лише після зростання концентрації пилу більше ГДК – і цикл роботи повторюється.

Слід зазначити, що збільшення глибини кар'єра понад 500 м призведе до значного погіршення аеродинаміки вітрових потоків на нижніх горизонтах кар'єру, що знизить енергію вітрових потоків і збільшить імовірність зага-

зованості робочих зон у нижній частині кар'єру. Крім цього слід враховувати значну концентрацію автотранспорту на нижніх горизонтах кар'єру, що призведе до збільшення загазованості і в самій зоні роботи автотранспорту.

Висновки. Головними чинниками, що призводять до погіршення повітрообміну в кар'єрах, є поєднання штилю з температурною інверсією. Імпульсне дрібнодисперсне зрошення є найбільш перспективним на сьогодні напрямком забезпечення повітрообміну та боротьби зі шкідливостями на відкритих кар'єрах. Розроблені водяні гармати дозволяють знизити концентрацію шкідливих речовин у кар'єрі. Через 36 хв після пострілу великої гармати дальністю польоту струменя 200 м і об'ємом води за цикл 1000 дм^3 відносна вологість повітря у всьому повітряному просторі нижче рівня гармати досягне 100 %. Для малої гармати дальністю польоту струменя 100 м і об'ємом води за цикл 200 дм^3 цей час становить 60 хв. При цьому температура встановиться постійна, і стратифікація стане байдужою. Створюються умови для відновлення повітрообміну. Також дрібнодисперсне розпилювання води є ефективним засобом пилоподавлення. При цьому режим роботи гармат має бути повторно-короткочасним до встановлення концентрації пилу на заданому рівні нижче гранично-допустимої.

Перспективи подальших досліджень. Одним із перспективних шляхів вирішення питань нормалізації атмосфери робочих зон глибоких кар'єрів є використання дрібнодисперсного аерозолу в якості тепло- і масообмінного реагенту для штучного процесу вентиляції застійних зон. На наш погляд, це може позитивно вплинути на якість повітряного середовища на робочих місцях на нижніх горизонтах глибоких кар'єрів.

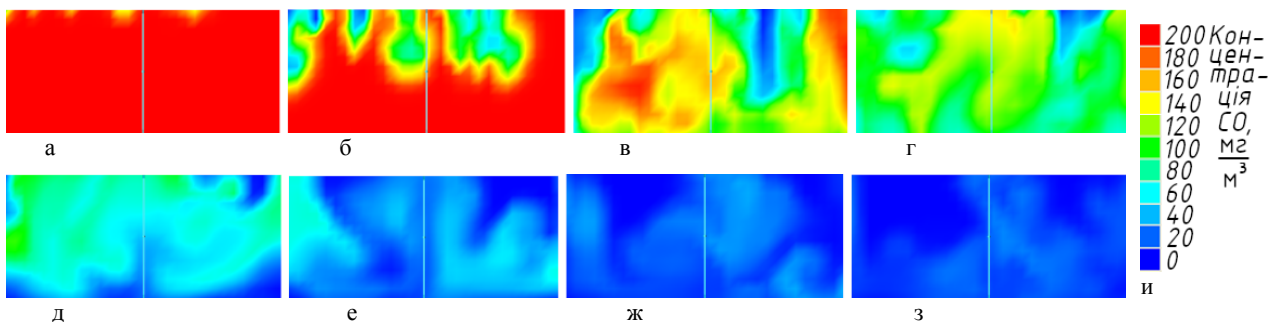


Рис. 2. Розподіл концентрації CO під водоповітряних шаром залежно від часу для великої гармати: а – 5 хв; б – 10 хв; в – 15 хв; г – 20 хв; д – 25 хв; е – 30 хв; ж – 35 хв; з – 40 хв; и – палітра

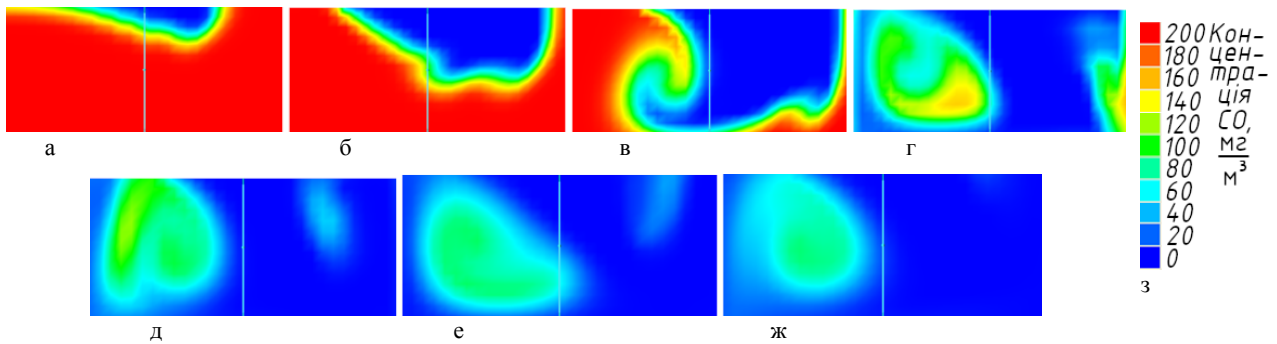


Рис. 3. Розподіл концентрації CO під водоповітряним шаром залежно від часу для малої гармати:
а – 5 хв; б – 10 хв; в – 15 хв; г – 20 хв; д – 25 хв; е – 30 хв; ж – 35 хв; з – палітра

Література

1. Абрамов Ф. А. К вопросу о проветривании глубоких карьеров / Ф. А. Абрамов // Материалы межобластной научно-технической конференции по открытой разработке месторождений Украины. – ДГИ. – Днепропетровск, 1957.
2. Конорев М. М. Искусственная вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров: дис. ... докт. техн. наук.: 05.26.01 : защищ. 1999 / Конорев, Михаил Максимович; Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, 1999. – 364 с.
3. Коркин Ю. М. Создание и применение карьерных вентиляторных установок типа УМП / Ю. М. Коркин и др. // Горный журнал. – 1984. – № 11. – С. 43-45.
4. Филатов С. С. Конструктивные особенности и технико-экономические показатели карьерного вентилятора-оросителя НК-12КВ-1М / С. С. Филатов, М. М. Конорев, Г. Ф. Нестеренко и др. // Горный журнал. – 1981. – № 6. – С. 43 - 46.
5. Конорев М. М. Система вентиляции и всесезонного пылегазоподавления / М. М. Конорев и др. // Горный журнал. – 1990. – № 7. – С. 47-49.
6. Сытенков В.Н. О целесообразности искусственного проветривания глубоких карьеров / В.Н. Сытенков // Горный журнал. – 2003. – №8. – С. 89-93.
7. Пат. РФ № 2162944. Способ вентиляции рудника / С.Н. Кузьмин, И.В. Бригадин; БИПМ № 4, 2001.
8. Пат. РФ № 2319837. Способ вентиляции карьера / С.Н. Кузьмин, И.М. Фадин; БИПМ № 20, 2008.
9. Бригадин И.В. Экспериментальное и теоретическое обоснование возможности вентиляции глубокого карьера каскадным взрывом ТВС / И.В. Бригадин, М.А. Затевахин, С.Н. Кузьмин // Физические проблемы разрушения горных пород. – Институт проблем комплексного освоения недр РАН. – 2005. – С. 267-270.
10. Битколов Н.Э. Аэрология карьеров / Н.Э. Битколов, И.И. Медведев. – Москва: Недра, 1992. – 302 с.
11. Кузьмин С.Н. Технология импульсного струйного проветривания глубоких карьеров. / С.Н. Кузьмин // Технично-технологические проблемы сервиса. – №2 (8). – 2009. – С. 60-61.
12. Козырев С.А. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров / С.А. Козырев, П.В. Амосов // Вестник МГТУ. – Т. 17. – № 2. – 2014. – С. 231-237
13. Вассерман А.Д. Эффективно ли решается проблема оздоровления атмосферы глубоких карьеров / А.Д. Вассерман // Горный журнал. – 1989. – № 11. – С. 49-51.
14. Вассерман А.Д., Козырев С.А. Научные основы создания и поддержания безопасного состояния воздушной среды при обработке месторождений полезных ископаемых / А.Д. Вассерман, С.А. Козырев // Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. Апатиты. – КНЦ РАН. – 2005. – С. 144-149.
15. Нестеренко Г.Ф. Управление аэрогазодинамическими и тепломассообменными процессами при нормализации атмосферы карьеров: автореф. дис. ... докт. техн. наук.: 25.00.20 / Нестеренко Г.Ф. ; Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук. – Пермь, 2008. – 47 с.
16. Анисимов В.Н. Пылегазоподавление при крупномасштабных массовых взрывах на карьерах с помощью тонкодисперсных водяных завес. / В.Н. Анисимов, В.А. Белин, Дугарцыренов А.В. // Горный журнал. – 2007. – №12. – С. 101-103.
17. Наливайко В.Г. Расчет эффективности пылеподавления мелкодисперсным дождеванием после массовых взрывов в карьерах / В.Г. Наливайко // Борьба с опасными и вредными производственными факторами на горнорудных предприятиях. – Москва: Наука, 1988. – С. 45-52.
18. Бересневич П.В. Способ борьбы с загрязнением атмосфера продуктами взрывов / П.В. Бересневич, В.Г. Наливайко, В.В. Ежов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1988. – № 5. – С. 44-19.
19. Наливайко В.Г. Оценка влияния массовых взрывов в карьерах на состояние атмосферы и обоснование способа пылеподавления мелкодисперсным орошением: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 11.00.11 / Наливайко В.Г. ; Институт проблем комплексного освоения недр. – Москва, 1989. – 19 с.

20. Заключительный отчет «Разработка способов и средств по нормализации атмосферы рабочих зон карьера ПАО «ИНГОК» в связи с продвижением горных работ в северном направлении». – НИГРИ ГВУЗ "КНУ" Договор № 2079-34 от 12.03.2012 г. – Кривой Рог, 2012. – 159 с.21.

21. Гладырь В.В. Управление газодинамическими процессами в атмосфере Первомайского и Анновского карьеров ОАО «Северный ГОК» / В. В. Гладырь, В. М. Куроченко // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Т. 94. – С. 157-161.

22. Конорев М.М. Оценка влияния температурной стратификации пылегазового облака (ПГО) и атмосферы на процесс его подъема и рассеяния / М.М. Конорев // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ (Мельниковские чтения): Тез. докл. междунар. конф. Москва-С-Пб.-Пермь, 1999. – С. 102-104.

References

1. Abramov F. A. *K voprosu o provetrivanii glubokikh karerov. Materialy mezhoblastnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po otkrytoy razrabotke mestorozhdenij Ukrainy*. DGI, 1957.

2. Konorev M. M. *Iskusstvennaia ventiliatsiia i pylegazopodavlenie v atmosfere karerov*. Diss. Institut gornogo dela Uralskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 1999.

3. Korkin Yu. M. i dr. "Sozdanie i primeneniie karernykh ventilatornykh ustanovok tipa UMP". *Gornyi zhurnal*. 1984. № 11. P. 43-45.

4. Filatov S. S., Konorev M. M., Nesterenko G. F. et al. "Konstruktivnye osobennosti i tehniko-ekonomicheskie pokazateli karernogo ventilatora-orositelia NK-12KV-1M". *Gornyi zhurnal*. 1981. No 6. P. 43-46.

5. Konorev M. M. et al. "Sistema ventiliatsii i vsesezonnogo pylegazopodavleniia". *Gornyi zhurnal*. 1990. No 7. P. 47-49.

6. Vasserman A.D. "Effektivno li reshaetsia problema ozdorovleniia atmosfery glubokikh karerov". *Gornyi zhurnal*. 1989. № 11. P. 49-51.

7. Vasserman A.D., Kozyrev S.A. "Nauchnye osnovy sozdaniia i podderzhaniia bezopasnogo sostoiianiia vozduшной srede pri otrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh". *Formirovanie osnov sovremennoj strategii prirodopol'zovaniia v Evro-Arkticheskom regione. Apatity*. KNC RAN. 2005. P. 144-149.

8. Sytenkov V.N. "O tselesoobraznosti iskusstvennogo provetrivaniia glubokikh karerov". *Gornyi zhurnal*. 2003. №8. P. 89-93.

9. Kuzmin S.N., Brigadin I.V. "Sposob ventiliatsii rudnika." Patent RF № 2162944, BIPM № 4, 2001.

10. Kuzmin S.N. Fadin I.M. "Sposob ventiliatsii ka'era." Patent RF № 2319837, BIPM № 20, 2008.

11. Brigadin I.V., Zatevahin M.A., Kuzmin S.N. "Eksperimentalnoe i teoreticheskoe obosnovanie vozmozhnosti ventiliatsii glubokogo karera kaskadnym vzryvom TVS". *Fizicheskie problemy razrusheniia gornyh porod*. Institut problem kompleksnogo osvoeniia neдр RAN. 2005. P. 267-270.

12. Bitkolov N.Je., Medvedev I.I. *Aerologiiia karerov*. Nedra, 1992.

13. Kuz'min S.N. "Tekhnologiiia impulsnogo struinogo provetrivaniia glubokikh karerov". *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa*. №2 (8) 2009. P. 60-61.

14. Kozyrev S.A., Amosov P.V. "Puti normalizatsii atmosfery glubokikh karerov". *Vestnik MGTU*. T. 17. № 2. 2014. P. 231-237.

15. Nesterenko G.F. *Upravlenie aerogazodinamicheskimi i teplomassoobmennymi processami pri normalizatsii atmosfery karerov*. Diss. abstract. Institut gornogo dela Uralskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2008.

16. Anisimov V.N., Belin V.A., Dugarcyrenov A.V. "Pylegazopodavlenie pri krupnomasshtabnykh massovykh vzryvakh na karerakh s pomoshchu tonkodispersnykh vodjainykh zaves". *Gornyi zhurnal*. 2007. №12. P. 101-103.

17. Nalivaiko V.G. "Raschet effektivnosti pylepodavleniia melkodispersnym dozhdevaniem posle massovykh vzryvov v karerakh". *Borba s opasnymi i vrednymi proizvodstvennymi faktorami na gornorudnyh predpriiatijah*. Nauka, 1988. P. 45-52.

18. Beresnevich P.V., Nalivaiko V.G., Ezhov V.V. i dr. "Sposob borby s zagriazneniem atmosfery produktami vzryvov". *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 1988. № 5. P. 44-19.

19. Nalivaiko V.G. *Ocenka vliianiia massovykh vzryvov v karerakh na sostoianie atmosfery i obosnovanie sposoba pylepodavleniia melkodispersnym orosheniem*. Institut problem kompleksnogo osvoeniia neдр, 1989.

20. *Zakljuchitel'nyj otchet «Razrabotka sposobov i sredstv po normalizatsii atmosfery rabochih zon kar'era PАО «INGOK» v svjazi s prodvizheniem gornyh работ v severnom napravlenii»*. NIGRI GVUZ "КНУ" Договор № 2079-34 от 12.03.2012. Krivoj Rog, 2012.

21. Gladyr V. V., Kurochenko V. M. "Upravlenie gazodinamicheskimi processami v atmosfere Первомайского и Анновского кар'еров ОАО «Северный ГОК»". *Razrabotka rudnykh mestorozhdenij*. 2011. V. 94. P. 157-161.

22. Конорев М.М. "Ocenka vliianiia temperaturnoi stratifikatsii pylegazovogo oblaka (PGO) i atmosfery na процесс ego podioma i rasseianiia". *Problemy bezopasnosti i sovershenstvovaniia gornyh работ (Mel'nikovskie chteniia): Tез. dokl. mezhdunar.onf*. Mooskva-S-Pb.-Perm, 1999. P. 102-104.

УДК (622.807:622.235.3)

Разработка эффективных способов и средств нормализации атмосферы рабочих зон карьеров

В. Г. Наливайко¹, В. А. Коновалюк²

¹к.т.н., Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина vadim.moris@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4452-6111

²к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина,
viktoria.konovalyuk@gmail.com ORCID: 0000-0001-5115-7188

Аннотация. В результате натурных исследований состояния воздушной среды действующих карьеров получены зависимости изменения концентрации оксида углерода с увеличением глубины карьера. Установлен недостаточный воздухообмен с окружающей средой во время штудий и температурной инверсии. Расчётно-аналитическими и экспериментальными исследованиями установлено, что для интенсификации воздухообмена в глубоком карьере целесообразны установки импульсного орошения с помощью мелкодисперсного аэрозоля. Для улучшения условий труда была разработана установка импульсного мелкодисперсного орошения УИМО (водяная пушка). При её выстреле вода распыляется в горизонтальном направлении. Исследовалась эффективность работы установок с различными характеристиками: большая пушка (дальность полёта струи – 200 м, объём воды, выбрасываемый за цикл, – 1000 дм³) и малая пушка (дальность полёта струи – 100 м, объём воды выбрасываемый за цикл – 200 дм³). Результаты эксперимента показывают, что для проветривания и очистки воздуха в запыленном объёме атмосферы нижних горизонтов глубоких карьеров большую эффективность имеет применение большой пушки. Количество установок выбирается из условия необходимости оросительной воды для эффективного проветривания застойной зоны или из условий интенсивности пыли- и газовой выделения на этом участке. Установка УИМО в период между взрывами и интенсификацией воздухообмена в карьере может быть использована для борьбы с пылью, витающей в атмосфере карьера, и на прилегающей территории. Особенно это касается узлов концентрации горного и транспортного оборудования на горизонтах карьера (перегрузочные площадки, застойные зоны в тупиковых забоях, при проходке траншей и т.д.). Применение установок УИМО позволит выполнять внутрикарьерные технологические работы на глубине более 500 м с применением автотранспортной доставки руды на перегрузочные пункты циклично-поточной технологии.

Ключевые слова: проветривание, загазованность, атмосфера карьера, ветровой поток, импульсная установка.

UDC (622.807:622.235.3)

Development of effective methods and means of normalizing the atmosphere of working zones of open-cast mines

V. Nalyvaiko¹, V. Konovaliuk²

¹PhD, associate professor. Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, vtdengub@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4452-6111

²PhD, associate professor. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine.
viktoria.konovalyuk@gmail.com ORCID: 0000-0001-5115-7188

Abstract. The search for technical solutions for effective air exchange in the space of deep open-cast mines. Since intensive air exchange is necessary to remove and disperse harmful impurities from the open-cast mines, improvement can be achieved mainly by intensifying natural air exchange based on phase transformations of liquids in the lower atmosphere of the working zones of the open-cast mines by creating a positive or negative temperature gradient. New technical solutions are considered that provide support for the sanitary-hygienic parameters of the atmosphere of the deep open-cast mines at the normative level. The formation of an ascending gas stream by a cascade explosion of a fuel-air mixture has the greatest efficiency. The proposed method allows for the implementation of a pulsed ventilation mode with a power of the outgoing air flow of more than 1010 W with a blasting fuel mass of 30 tons. It has been established by analytical and experimental studies that it is advisable to use pulsed fine irrigation systems to intensify air exchange in a deep open-cast mines, using the double effect, ventilating gaseous working zones and cleaning them from harmful substances with the help of a fine aerosol freely floating in space. It is also advisable to use such facilities to reduce peak loads on emissions of harmful substances from the open-cast mines into the environment and to normalize the composition of the atmosphere of the deep open-cast mines. Significant peak emissions of harmful impurities in open-cast mines include mass explosions and situations involving the creation of internal inversion zones. In a computational experiment, there are two water guns: big gun (the water jet range is 200 m, water volume per one cycle is 1000 dm³) and small gun (the water jet range is 100 m, water volume per one cycle is 200 dm³). The results of the experiment indicate greater efficiency in the use of a large water gun for airing the lower horizons of the deep open-cast mines. The use of pulsed fine irrigation systems will allow for carrying out internal technological work at a depth of more than 500 meters using a motorized ore delivery system to transfer points of cyclic-flow technology.

Keywords: ventilation, gas contamination, open pit atmosphere, wind flow, impulse installation.

Надійшла до редакції / Received 25.06.2020

Припливно-витяжні установки
з рекуперацією тепла

ВЕНТС ВУТ 180 П5Б ЕС



Продуктивність:
до 220 м³/год



Ефективність
рекуперації:
до 98 %

Корпус виготовлено
зі спіненого поліпропілену
(EPP), який має високі тепло-
та звукоізоляційні властивості

www.vents.ua



ПЕРЕВАГИ для вашого проекту



Без конденсату
(модифікація ВУЕ)



Горизонтальний
або вертикальний
монтаж



Зручне
обслуговування



Монтаж
на гіпсокартон



Швидкий
монтаж



Найменша вага
серед свого
типорозміру

УДК 532.542.1

Чисельне моделювання нестационарної течії в'язкої нестисливої рідини в плоских каналах довільної форми теплообмінних апаратів

Ю. В. Човнюк¹, В. Т. Кравчук², А. С. Москвітін³, І. О. Пефтева⁴

¹к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

²к.т.н., проф. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, vtk1@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-5213-3644

³асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁴асист. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, piefteva.io@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-8858-9010

Анотація. У даній роботі описано загальний метод чисельного розв'язку задачі про нестационарну течію в'язкої нестисливої рідини ((полі-)етиленгліколь, гліцерин) у плоских каналах довільної форми теплообмінних апаратів. Однією з основних проблем чисельного розв'язку задач математичної фізики є представлення граничних умов для областей довільної форми. Ефективне розв'язання задачі досягається шляхом застосування адаптивних сіток. Для цього знаходиться така система координат, не обов'язково ортогональна, у якій межові лінії або поверхні розрахункової області збігаються з координатними лініями або поверхнями. Математична модель течії базується на двомірних рівняннях Нав'є-Стокса в змінних «функція течії-вихор» і рівнянні Пуассона для тиску, які розв'язуються на основі кінцево-різницевого методу. Проведено чисельне моделювання потоку рідини у плоскому криволінійному коліні теплообмінного апарату при числі Рейнольдса $Re=1000$. Дана форма відповідає найбільш характерним особливостям проточних частин різноманітних теплообмінних апаратів, гідравлічних машин, гідравлічних та трубопровідних систем. Подання чисельних результатів здійснено на основі пакету підпрограм графічної обробки VISSIM.

Ключові слова: чисельне моделювання, нестационарна течія, в'язка нестислива рідина, плоский канал, теплообмінний апарат, рівняння Нав'є-Стокса, рівняння Пуассона, метод адаптивних сіток.

Постановка проблеми. Обґрунтувати розробку й створення будь-якого пристрою, у якому відбувається взаємодія між потоком рідини й елементами проточних частин (наприклад, транспортні та енергетичні машини, теплообмінні апарати, магістральні трубопроводи), неможливо без детальної інформації про характеристики потоку, про сили на поверхнях, які обтікаються, про віброакустичні явища тощо.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Серед різних засобів отримання інформації про характеристики потоку, про сили на поверхнях, які обтікаються, про віброакустичні явища тощо важливу роль відіграють теоретичні методи. Вони спираються на рівняння гідродинаміки й чисельні методи їхнього розв'язку. При цьому для ламінарних течій основні зусилля спрямовано на розв'язок системи рівнянь Нав'є-Стокса [1...3].

У даній роботі розглянуто загальний метод чисельного розв'язку задачі про нестационарну течію в'язкої нестисливої рідини у плоских каналах довільної форми теплообмінних апаратів. Ефективний розв'язок задачі досягається за-

стосуванням адаптивних сіток.

Математична модель течії базується на двовимірних рівняннях Нав'є-Стокса у змінних «функція течії-вихор» й рівнянні Пуассона для тиску, які розв'язуються на основі кінцево-різницевого методу.

Проведено чисельне моделювання потоку рідини у плоскому криволінійному коліні при числі Рейнольдса $Re = 1000$. Дана форма відповідає найбільш характерним особливостям проточних частин різноманітних гідромашин, теплообмінних апаратів, гідравлічних і трубопровідних систем. Представлення чисельних результатів здійснено на основі пакету підпрограм графічної обробки VISSIM.

Однією з основних проблем чисельного розв'язку задач математичної фізики є представлення граничних умов для областей довільної форми. Реалізація різноманітних штучних прийомів для апроксимації як самих криволінійних границь, так і граничних умов на них, може призводити до значних втрат точності розв'язку. Особливо це проявляється у задачах, у яких розв'язки у прилежній області мають максимальні градієнти.

Ефективним методом розв'язання цієї проблеми є застосування адаптованих сіток для розрахункової області. Сутність цього методу полягає в тому, що знаходиться така система координат, не обов'язково ортогональна, у якій межові лінії (поверхні) області збігаються з координатними лініями (поверхнями).

У плоскому випадку розрахункова область трансформується у прямокутну, а межа крива відображається на сторони прямокутника. Практично задача побудови адаптованої сітки зводиться до знаходження функцій, які описують відтворення канонічної (прямокутної) області на область, для якої первісно сформульована задача.

Для двовимірного випадку вводяться нові безрозмірні криволінійні координати ξ, η і визначаються функції $x(\xi, \eta)$ та $y(\xi, \eta)$. Як показано у роботі [4], ці функції можуть бути знайдені з розв'язку системи двох квазілінійних рівнянь еліптичного типу з граничними умовами першого роду (задача Діріхле). Ці рівняння мають вигляд

$$\begin{cases} \alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} + J^2(Q_1 x_{\xi} + Q_2 x_{\eta}) = 0; \\ \alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} + J^2(Q_1 y_{\xi} + Q_2 y_{\eta}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де α, β й γ – параметри:

$$\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2, \text{ м}^2; \quad (2)$$

$$\beta = x_{\xi} x_{\eta} + y_{\xi} y_{\eta}, \text{ м}^2; \quad (3)$$

$$\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2, \text{ м}^2; \quad (4)$$

J – якобіан перетворення, а саме

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi}, \text{ м}^2; \quad (5)$$

$Q_1(\xi, \eta)$ та $Q_2(\xi, \eta)$ – деякі функції, що дозволяють регулювати розміщення координатних ліній у фізичній площині, їхній явний вираз наведений у роботі [5]; нижні індекси ξ та η означають частинну похідну за відповідними криволінійними координатами.

Формулювання цілей статті. Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні чисельного методу моделювання нестационарної течії в'язкої нестисливої рідини в плоских каналах довільної форми теплообмінних апаратів.

Виклад основного змісту дослідження. Система (1) для координатних функцій $x(\xi, \eta)$,

$y(\xi, \eta)$, m , вирішується в прямокутній області. Граничними умовами є значення координат контуру фізичної області.

Диференціальні рівняння апроксимувалися кінцево-різницевиими співвідношеннями із другим порядком точності на прямокутному дев'ятиточковому шаблоні (завдяки наявності змішаних похідних) з кроком $\Delta\xi = \Delta\eta = 1$.

Система різницевих рівнянь розв'язується ітераційним методом Гаусса-Зейделя в розрахунковій області на сітці (рис. 1 – у площині x, y).

Криволінійні ділянки межі описані дугами кіл, які дотичні до прямолінійних ділянок. У даній роботі відображення $x(\xi, \eta)$, $y(\xi, \eta)$, m , що забезпечує побудову адаптивної сітки, отримано з розв'язку системи (1), у якій прийнято $Q_1 + Q_2 = 0$. Кількість вузлів становить 128×64 , серед яких на твердих границях маємо 128 вузлів, а на вході й виході – 64.

Система рівнянь Нав'є-Стокса для середовища з постійними фізичними властивостями за відсутності зовнішніх сил у векторній формі

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v}, \text{ м/с}^2; \\ (\nabla \cdot \vec{v}) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де t – час, s , \vec{v} – вектор швидкості, m/s ; p – тиск у потоці, Pa ; ν – кінематична в'язкість, m^2/s ; ρ – густина середовища, kg/m^3 ; ∇ – оператор Гамільтона; $\nabla^2 = (\nabla \cdot \nabla)$ – оператор Лапласа.

Дією оператора ротора на рівняння (6) можна вилучити тиск і отримати рівняння переносу вихору $\vec{\omega} = [\nabla \cdot \vec{v}] = \text{rot } \vec{v}, c^{-1}$, у вигляді

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} = (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{v} - (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{\omega} + \nu (\nabla^2 \vec{\omega}), c^{-2}. \quad (7)$$

У плоскому випадку $(\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{v} = 0$. Тоді в декартовій системі координат вихор

$$\vec{\omega} = \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x}, c^{-1}, \quad (8)$$

де v_x і v_y – компоненти швидкості, m/s , на відповідні осі.

Визначасмо функцію течії $\psi, m^2/c$

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \text{ м/с}; \\ v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \text{ м/с}, \end{cases} \quad (9)$$

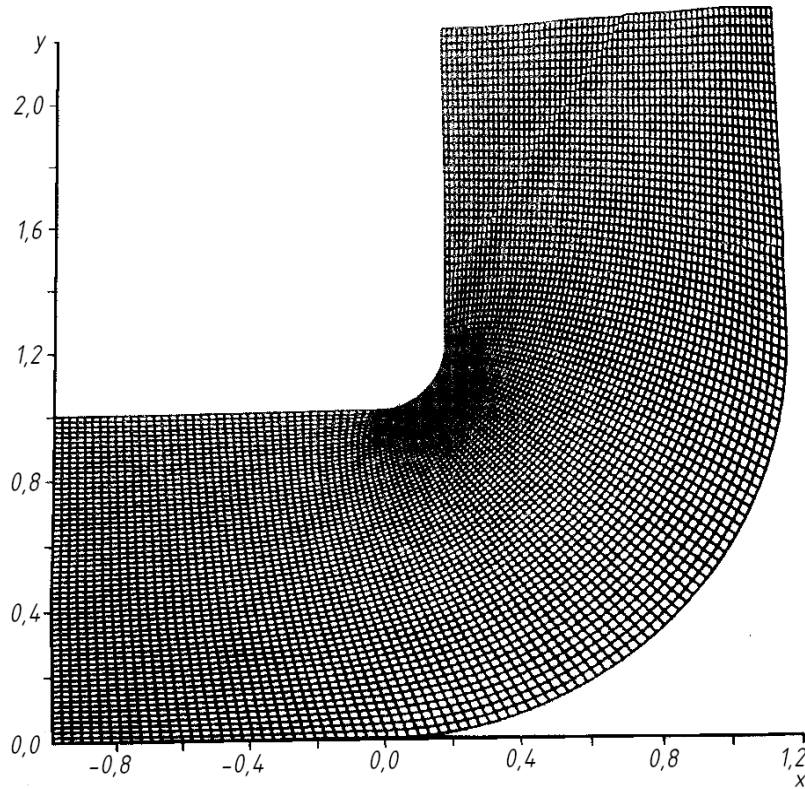


Рис. 1. Розрахункова область і сітка в площині (x, y)

де v_x і v_y – компоненти вектора швидкості, м/с, уздовж відповідної осі x та y

Уводимо безрозмірні величини з використанням характерної швидкості потоку v_0 , м/с, і розміру області течії L , м,

$$\begin{aligned}
 \tilde{v}_x &= v_x / v_0; \\
 \tilde{v}_y &= v_y / v_0; \\
 \tilde{x} &= x / L; \\
 \tilde{y} &= y / L; \\
 \tilde{\omega} &= \frac{\omega L}{v_0}; \\
 \tilde{t} &= Ho = \frac{t v_0}{L}; \\
 \tilde{\Psi} &= \frac{\Psi}{v_0 L}; \\
 \tilde{p} &= Eu = \frac{p}{\rho v_0^2}; \\
 \tilde{\Psi} &= \frac{\Psi}{v_0 L}; \\
 Re &= \frac{v_0 L}{\nu}; \\
 \tilde{J} &= \tilde{x}_\xi \tilde{y}_\eta - \tilde{x}_\eta \tilde{y}_\xi = J / L^2; \\
 \tilde{\alpha} &= \tilde{x}_\eta^2 + \tilde{y}_\eta^2 = \alpha / L^2; \\
 \tilde{\beta} &= \tilde{x}_\xi \tilde{x}_\eta + \tilde{y}_\xi \tilde{y}_\eta = \beta / L^2; \\
 \tilde{\gamma} &= \tilde{x}_\xi^2 + \tilde{y}_\xi^2 = \gamma / L^2,
 \end{aligned} \tag{10}$$

де Ho – критерій гомохронності, Eu – критерій Ейлера, а Re – критерій Рейнольдса.

Рівняння (6) і (8) у безрозмірних змінних

$$\begin{cases}
 \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{t}} + \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \tilde{y}} \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}} - \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \tilde{\omega}; \\
 \nabla^2 \tilde{\Psi} = \tilde{\omega}.
 \end{cases} \tag{11}$$

В адаптованій системі координат рівняння (11) мають вигляд

$$\begin{cases}
 \tilde{\omega}_t + \frac{\tilde{\Psi}_\eta \cdot \tilde{\omega}_\xi - \tilde{\Psi}_\xi \cdot \tilde{\omega}_\eta}{\tilde{J}} = \frac{\tilde{\alpha} \cdot \tilde{\omega}_{\xi\xi} - 2\tilde{\beta} \tilde{\omega}_{\xi\eta} + \tilde{\gamma} \tilde{\omega}}{\tilde{J}^2 Re}; \\
 \frac{\tilde{\alpha} \cdot \tilde{\Psi}_{\xi\xi} - 2\tilde{\beta} \cdot \tilde{\Psi}_{\xi\eta} + \tilde{\gamma} \tilde{\Psi}_{\eta\eta}}{\tilde{J}^2} = \tilde{\omega}.
 \end{cases} \tag{12}$$

Компоненти вектора швидкості в цьому випадку вздовж осей ξ та η , відповідно,

$$\begin{cases}
 \tilde{v}_\xi = \frac{1}{\tilde{J}} \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \eta}; \\
 \tilde{v}_\eta = -\frac{1}{\tilde{J}} \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \xi}.
 \end{cases} \tag{13}$$

Для системи (12) ставиться початково-гранична задача. У нових змінних ξ, η граничні

умови для рівнянь (12) ставляться таким чином. На твердих границях $\eta = 0$ і $\eta = \eta_{w2}$ функція течії вважається постійною і рівною, відповідно, $\tilde{\Psi}_{w1}$ і $\tilde{\Psi}_{w2}$ тобто

$$\tilde{\Psi}(0) = \tilde{\Psi}_{w1}, \tilde{\Psi}(\eta_{w2}) = \tilde{\Psi}_{w2}. \quad (14)$$

Значення вихору на цих межах може бути отримане з розкладання функції течії в ряд Тейлора в околиці межевої точки $(i, 1)$ $(i, 1)$ із залученням умови «прилипання» $v_w = 0$

$$\tilde{\Psi}_{i,2} = \tilde{\Psi}_{i,1} + \left. \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \eta} \right|_{i,1} \Delta \eta + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \tilde{\Psi}}{\partial \eta^2} \right|_{i,1} (\Delta \eta)^2 + 0 \left((\Delta \eta)^3 \right); \quad (15)$$

$$\tilde{v}_{\xi}|_{i,1} = \frac{1}{\tilde{J}} \left. \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \eta} \right|_{i,1} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 \tilde{\Psi}}{\partial \eta^2} \right|_{i,1} = \frac{\tilde{\omega} \tilde{J}^2}{\tilde{\gamma}} \Big|_{i,1}. \quad (16)$$

де $\Delta \eta$ – крок сітки координати η .

Останнє співвідношення отримане з рівняння (12) при умові, що на стінці

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \xi} = -\tilde{J} \tilde{v}_{\eta} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{\Psi}}{\partial \eta} = \tilde{J} \cdot \tilde{v}_{\xi} = 0.$$

Підставляємо співвідношення (16) до (15) і знаходимо значення вихору на стінці

$$\tilde{\omega}|_{i,1} = \frac{2(\tilde{\Psi}_{i,2} - \tilde{\Psi}_{i,1}) \tilde{\gamma}}{\tilde{J}^2 (\Delta \eta)^2}. \quad (17)$$

Гранична умова (17) є узагальненням на випадок адаптованої сітки умов Томана [2]. На вхідній границі задається розподіл $\tilde{\Psi}_{i,j} = f(\eta)$, де $f(\eta)$ – розв’язок задачі Пуазейля для ламінарної течії [6]. Значення вихору на вході визначається з рівняння (12) за відомого розподілу $\tilde{\Psi}(\xi, \eta)$ у даний момент часу. На вихідній межі виставляються граничні умови

$$\frac{\partial \tilde{v}_{\eta}}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \xi} = 0, \quad (18)$$

які узагальнюють умови Томана-Шевчіка.

Початковою умовою у момент часу $\tilde{t} = 0$ задається розв’язок Пуазейля:

$$\tilde{\Psi}(\xi, \eta)|_{\tilde{t}=0} = -\frac{4}{3} \eta^3 + 2 \eta^2; \quad (19)$$

$$\tilde{\omega}(\xi, \eta)|_{\tilde{t}=0} = -8 \eta + 4. \quad (20)$$

Для чисельного розв’язку системи (12) використовується явна різницева схема. Похідна $\partial \tilde{\omega} / \partial \xi$ апроксимується одностороннім різницеvim співвідношенням «уперед». Похідні за просторовими змінними для членів, крім конвективних, апроксимуються їхніми центрально-різницеvими аналогами на дев’яти-точковому шаблоні. Конвективні члени апроксимуються за іншою схемою з різницями «проти» потоку (схема з донорськими комітками [2])

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_{\eta} \frac{\tilde{\omega}_{\xi}}{\tilde{J}} = \tilde{v}_{\xi} \tilde{\omega}_{\xi} \approx \frac{\tilde{v}_{R}^{\xi} \tilde{\omega}_{R} - \tilde{v}_{L}^{\xi} \tilde{\omega}_{L}}{\Delta \xi}; \\ -\tilde{\Psi}_{\xi} \frac{\tilde{\omega}_{\eta}}{\tilde{J}} = \tilde{v}_{\eta} \tilde{\omega}_{\eta} \approx \frac{\tilde{v}_{R}^{\eta} \tilde{\omega}_{R} - \tilde{v}_{L}^{\eta} \tilde{\omega}_{L}}{\Delta \eta}, \end{cases} \quad (21)$$

де

$$\tilde{v}_{R}^{\xi} = \frac{\tilde{v}_{i+1,j}^{\xi} + \tilde{v}_{i,j}^{\xi}}{2};$$

$$\tilde{v}_{L}^{\xi} = \frac{\tilde{v}_{i-1,j}^{\xi} + \tilde{v}_{i,j}^{\xi}}{2};$$

$$\tilde{v}_{i,j}^{\xi} = \frac{\tilde{\Psi}_{i,j+1} - \tilde{\Psi}_{i,j-1}}{2 \Delta \eta \tilde{J}_{i,j}};$$

$$\tilde{\omega}_{R} = \begin{cases} \tilde{\omega}_{i,j} & \text{при } \tilde{v}_{R}^{\xi} \geq 0; \\ \tilde{\omega}_{i+1,j} & \text{при } \tilde{v}_{R}^{\xi} < 0; \end{cases}$$

$$\tilde{\omega}_{L} = \begin{cases} \tilde{\omega}_{i-1,j} & \text{при } \tilde{v}_{L}^{\xi} \geq 0; \\ \tilde{\omega}_{i,j} & \text{при } \tilde{v}_{L}^{\xi} < 0; \end{cases}$$

$$\tilde{v}_{R}^{\eta} = \frac{\tilde{v}_{i,j+1}^{\eta} + \tilde{v}_{i,j}^{\eta}}{2};$$

$$\tilde{v}_{L}^{\eta} = \frac{\tilde{v}_{i-1,j}^{\eta} + \tilde{v}_{i,j}^{\eta}}{2};$$

$$\tilde{v}_{i,j}^{\eta} = -\frac{\tilde{\Psi}_{i,j+1} - \tilde{\Psi}_{i-1,j}}{2 \Delta \xi \tilde{J}_{i,j}};$$

$$\tilde{\omega}_R = \begin{cases} \tilde{\omega}_{i,j} & \text{при } \tilde{v}_R^\eta \geq 0; \\ \tilde{\omega}_{i,j+1} & \text{при } \tilde{v}_R^\eta < 0; \end{cases}$$

$$\tilde{\omega}_L = \begin{cases} \tilde{\omega}_{i,j-1} & \text{при } \tilde{v}_L^\eta \geq 0; \\ \tilde{\omega}_{i,j} & \text{при } \tilde{v}_L^\eta < 0; \end{cases}$$

де $\Delta\xi$ – крок сітки координати ξ ; i, j – номери вузлів розрахункової сітки; верхні індекси означають, що здійснюється поворот («підкрутка») саме за цією координатою адаптованої сітки для розрахунків.

Рівняння для функції течії (12) на кожному часовому прошарку вирішується ітераційним методом Гаусса-Зейделя.

Оцінка стійкості різницевої схеми для рівняння (12) може бути проведена на основі методу Фур'є. При цьому коефіцієнти схеми вважаються «замороженими» [2, 7]. Після елементарних перетворень отримаємо вираз для множника переходу G

$$G = \frac{W^{n+1}}{W^n} = 1 - 2(d_\xi + d_\eta) + 2(d_\xi \cos \theta_\xi + d_\eta \cos \theta_\eta) + 4d_{\xi\eta} \sin \theta_\xi \sin \theta_\eta - I(C_\xi \sin \theta_\xi + C_\eta \sin \theta_\eta), \quad (22)$$

де

$$d_\xi = A \frac{\Delta \tilde{t}}{(\Delta \xi)^2};$$

$$d_\eta = C \frac{\Delta \tilde{t}}{(\Delta \eta)^2};$$

$$d_{\xi\eta} = B \frac{\Delta \tilde{t}}{4 \Delta \xi \Delta \eta};$$

$$A = \frac{\tilde{\alpha}}{\tilde{J}^2 Re};$$

$$B = \frac{2\beta}{\tilde{J}^2 Re};$$

$$C = \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{J}^2 Re};$$

C_ξ і C_η – числа Куранта на адаптивній сітці

$$C_\xi = \tilde{v}^\xi \frac{\Delta \tilde{t}}{\Delta \xi},$$

$$C_\eta = \tilde{v}^\eta \frac{\Delta \tilde{t}}{\Delta \eta};$$

W^n – амплітуда Фур'є-компоненти на часовому прошарку n ; $\theta_\xi = k_\xi \Delta \xi$ і $\theta_\eta = k_\eta \Delta \eta$ – фазові кути; k_ξ й k_η – хвильові числа; $\Delta \eta$ – крок сітки координати η ; $\Delta \tilde{t}$ – крок сітки безрозмірного часу (критерію гомохронності). $I = (-1)^{1/2}$ – уявна одиниця.

Для обмеження розв'язку (за величиною) необхідно, щоб для всіх θ_ξ та θ_η виконувалась умова

$$|G| \leq 1. \quad (23)$$

Оскільки вираз для G має комплексний вигляд, умова (23) може бути послабленою системою нерівностей

$$|\Re(G)| \leq 1; \quad (24)$$

$$|\Im(G)| \leq 1, \quad (24)$$

де \Re – дійсна частина комплексного числа, а \Im – уявна.

Нерівності (24) й (25) впливають із виразу $|G| \leq |\Re(G)| + |\Im(G)|$. Аналіз функції $\Re(G)$ як функції двох змінних θ_ξ, θ_η з системи

$$\frac{\partial}{\partial \theta_\xi} \Re(G) = \frac{\partial}{\partial \theta_\eta} \Re(G) = 0 \quad (26)$$

показує екстремуми при $\sin \theta_\xi = \sin \theta_\eta = 0$. Звідси випливає, що $\cos \theta_\xi = \pm 1$, $\cos \theta_\eta = \pm 1$ [7]. На основі цього умова стійкості визначається нерівністю

$$d_\xi + d_\eta \leq \frac{1}{2}. \quad (27)$$

З нерівності (26) випливає, що

$$C_\xi + C_\eta \leq 1. \quad (28)$$

Остаточно отримаємо, що для стійкості розв'язку кінцево-різницевих рівнянь повинна задовольнитися система нерівностей (27) і (28). При $d_\xi = d_\eta = d$ обмеження на величину

кроку за часом визначається з нерівності

$$\Delta \tilde{t} \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{(\Delta \xi)^2}{A}. \quad (29)$$

Підставляємо нерівність (29) до умови (28).
Покладаємо $\Delta \zeta = \Delta \eta$. Отримаємо обмеження на сіткове число Рейнольдса Re_c

$$Re_c = \left(|\tilde{v}^\xi| + |\tilde{v}^\eta| \right) \frac{\Delta \xi}{A} \leq 4. \quad (30)$$

Приведемо чисельні оцінки, які ілюструють виконання умов (27) і (28) для обраних просторово-часових кроків $\Delta \tilde{t} = 10^{-3}$, $\Delta \zeta = \Delta \eta = 1$ та $Re = 10^3$. У площині (x, y) маємо

$$\max(|\tilde{x}|) \approx \max(|\tilde{y}|) \approx 1.$$

У площині (ξ, η) маємо

$$\max(|\xi|) \approx \max(|\eta|) \approx 10^2.$$

Звідси випливає, що

$$(\tilde{x}_\xi, \tilde{y}_\xi, \tilde{x}_\eta, \tilde{y}_\eta) \approx 10^{-2};$$

$$\tilde{J} \approx 10^{-4};$$

$$\tilde{v}^\xi = \frac{\tilde{y}_\eta \tilde{v}_x - \tilde{x}_\eta \tilde{v}_y}{\tilde{J}} \approx 10^2,$$

оскільки

$$\max|\tilde{v}_x| \approx \max|\tilde{v}_y| \approx 1.$$

Продовжуємо оцінювання й отримаємо $C_\xi \approx 10^{-1}$, $C_\eta \approx 10^{-1}$, $(\alpha, \beta, \gamma) \approx 10^{-4}$, $(A, B, C) \approx 10^1$, $d_\xi \approx d_\eta \approx 10^{-2}$.

З наведених оцінок видно, що умови (27) і (28) виконуються зі значним запасом, а обрані просторово-часові кроки забезпечують стійкий розв'язок кінцево-різницевого рівнянь.

Процедури визначення поля тиску в потоці для відомих $\tilde{\psi}$ та $\tilde{\omega}$ заснована на розв'язку рівняння Пуассона

$$\nabla^2 \tilde{p} = -\nabla \cdot [(\tilde{v} \cdot \nabla) \cdot \tilde{v}]. \quad (31)$$

Воно отримане дією оператора дивергенції

на залежність (6) із урахуванням $(\tilde{v} \cdot \nabla) = 0$. При розв'язуванні рівняння (31) ставляться граничні умови другого роду (задача Неймана). При цьому на межі задається функція $\partial \tilde{p} / \partial \tilde{n}$, де \tilde{n} – нормаль до межі. Функція $\partial \tilde{p} / \partial \tilde{n}$ на межі визначається з рівняння руху (6)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} &= \tilde{n} \cdot \nabla \tilde{p} = \\ &= \frac{\partial (\tilde{v} \cdot \tilde{n})}{\partial \tilde{t}} - \tilde{n} \cdot [(\tilde{v} \cdot \nabla) \cdot \tilde{v}] + \frac{\tilde{n} \cdot \nabla^2 \tilde{v}}{Re}. \end{aligned} \quad (32)$$

Звідси випливає, що на твердих межах за умови «прилипання»

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} = \frac{\tilde{n} \cdot \nabla^2 \tilde{v}}{Re}. \quad (33)$$

Значимо основні особливості задачі Неймана для рівняння Пуассона. По-перше, розв'язок визначений з точністю до адитивної константи, і тому не є єдиним можливим. По-друге, необхідна умова існування розв'язку

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot [(\tilde{v} \cdot \nabla) \cdot \tilde{v}] d\Omega = - \int_S \frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} dS, \quad (34)$$

де Ω – область течії; S – її межа.

Крім того, різницевий оператор L^h задачі Неймана має сингулярну матрицю ($\det L^h = 0$) [8]. Завдяки математичній специфіці, розв'язок задачі (31) і (32) на адаптованій сітці спряжений зі значними обчислювальними труднощами. Щоб їх звести до мінімуму, у даній роботі на частині граничної кривої для (31) ставляться граничні умови першого роду (задача Діріхле)

$$\tilde{p} = \int_{(\ell_d)} \nabla \tilde{p} \cdot d\vec{r} + \tilde{p}_o, \quad (35)$$

де ℓ_d – частина межі області; \tilde{p}_o – адитивна постійна; \vec{r} – радіус-вектор.

У розрахунку константи \tilde{p}_o присвоюється деяке значення, яке конкретизує поверхню розв'язку $\tilde{p}(\vec{r})$. На іншій частині межі ℓ_n зберігаються граничні умови другого роду (32).

У розрахунках ℓ_d містила стінки проточної частини й вхід до неї. Ділянці межі ℓ_n відповідав вихід з проточної частини.

За відомими розв'язками \tilde{p} , $\tilde{\psi}$ та $\tilde{\omega}$ знаходиться вектор напруження на стінці [9]

$$\vec{p}_n = \frac{-\vec{p} \cdot \vec{n} + (\vec{n} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}}{Re} \quad (36)$$

У довільній системі координат, адаптованій до границь двовимірної області, рівняння (31) має вигляд

$$\tilde{\alpha} \tilde{p}_{\xi\xi} - 2\tilde{\beta} \tilde{p}_{\xi\eta} + \tilde{\gamma} \tilde{p}_{\eta\eta} = \tilde{J}^2 F(\xi, \eta), \quad (37)$$

де $F(\xi, \eta)$ – функція

$$F(\xi, \eta) = -\frac{2}{\tilde{J}^2} \times \\ \times \left((\tilde{y}_\eta \tilde{v}_\xi^y - \tilde{y}_\xi \tilde{v}_\eta^y) (-\tilde{x}_\eta \tilde{v}_\xi^x + \tilde{x}_\xi \tilde{v}_\eta^x) - \right. \\ \left. \times (\tilde{y}_\eta \tilde{v}_\xi^x - \tilde{y}_\xi \tilde{v}_\eta^x) (-\tilde{x}_\eta \tilde{v}_\xi^y + \tilde{x}_\xi \tilde{v}_\eta^y) \right). \quad (38)$$

Гранична умова (35) записується у координатній формі, а саме

$$\tilde{p} = \int_{(\ell_n)} \left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \eta} d\eta \right) + \tilde{p}_o. \quad (39)$$

У площині (ξ, η) інтегрування на межі області здійснюється впродовж відрізків координатних ліній, які обмежують прямокутну область. У результаті на вертикальній ділянці границі перший член у виразі (39) нульовий, оскільки $d\xi = 0$.

Аналогічно на горизонтальних ділянках нульовим стає другий член, оскільки $d\eta = 0$. При цьому для горизонтальних ділянок, тобто на стінці, отримуємо простий вираз для розрахунку тиску

$$\tilde{p}_w(\xi) = \frac{1}{Re} \int_{\xi_1}^{\xi_2} -\frac{\tilde{\beta} \tilde{\omega}_\xi + \tilde{\gamma} \omega_\eta}{\tilde{J}} d\xi + \tilde{p}(\xi_1). \quad (40)$$

При інтегруванні за координатою η значення $\partial \tilde{p} / \partial \eta$ визначаються зі співвідношення

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \eta} = \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \tilde{x}_\eta + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} \tilde{y}_\eta \quad (41)$$

У свою чергу, похідні $\partial \tilde{p} / \partial \tilde{x}$ і $\partial \tilde{p} / \partial \tilde{y}$ визначаються з рівняння (6), а саме

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = -\frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{t}} - \frac{\tilde{v}_x}{\tilde{J}} \left(\tilde{y}_\eta \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \xi} - \tilde{y}_\xi \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \eta} \right). \quad (42)$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = -\frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{t}} - \frac{\tilde{v}_x}{\tilde{J}} \left(\tilde{y}_\eta \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \xi} - \tilde{y}_\xi \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \eta} \right) - \\ - \frac{\tilde{v}_y}{\tilde{J}} \left(-\tilde{x}_\eta \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \xi} + \tilde{x}_\xi \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \eta} \right) + \\ + \frac{1}{Re \tilde{J}} \left(-\tilde{x}_\eta \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \xi} + \tilde{x}_\xi \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \eta} \right); \quad (42)$$

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} = -\frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \tilde{t}} - \frac{\tilde{v}_x}{\tilde{J}} \left(\tilde{y}_\eta \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \xi} - \tilde{y}_\xi \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \eta} \right) - \\ - \frac{\tilde{v}_y}{\tilde{J}} \left(-\tilde{x}_\eta \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \xi} + \tilde{x}_\xi \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \eta} \right) + \\ + \frac{1}{Re \tilde{J}} \left(-\tilde{y}_\eta \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \xi} + \tilde{y}_\xi \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \eta} \right). \quad (43)$$

Похідні $\partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{t}$ та $\partial \tilde{v}_y / \partial \tilde{t}$ обчислюються за значеннями v_x та v_y на двох сусідніх часових прошарках. Похідні за просторовими змінними апроксимувалися їхніми кінцево-різницевиими аналогами з другим порядком точності.

Розрахунок інтеграла (39) зі змінною верхньою межею здійснювався за формулою Симпсона. Співвідношення (42), (43) використовувалися також для розрахунку похідної $\partial \tilde{p} / \partial n$ на ділянці ℓ_n , а саме

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} = n_x \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + n_y \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}}, \quad (44)$$

де n_x і n_y – компоненти вектору нормалі $\partial \vec{n}$.

Сіткова апроксимація рівняння (39) проводилася на дев'ятиточковому шаблоні. Для розв'язку різницевих рівнянь застосувалась ітеративна процедура Гаусса-Зейделя

$$\tilde{p}_{i,j}^{k+1} = \\ \left(\tilde{\alpha}_{i,j} \frac{\tilde{p}_{i+1,j}^m + \tilde{p}_{i-1,j}^{m+1}}{\Delta \xi^2} - 2\tilde{\beta}_{i,j} \times \right. \\ \times \frac{\tilde{p}_{i+1,j+1}^m - \tilde{p}_{i+1,j-1}^{m+1} - \tilde{p}_{i-1,j+1}^m + \tilde{p}_{i-1,j-1}^{m+1}}{4 \Delta \xi \Delta \eta} + \\ \left. + \tilde{\gamma}_{i,j} \frac{\tilde{p}_{i,j+1}^m + \tilde{p}_{i,j-1}^{m+1}}{\Delta \eta^2} - \tilde{J}_{i,j}^2 F_{i,j} \right) \div \\ \div \left(\frac{2\tilde{\alpha}_{i,j}}{\Delta \xi^2} + \frac{2\tilde{\gamma}_{i,j}}{\Delta \eta^2} \right), \quad (45)$$

де m – часовий шар.

Співвідношення (36) для розрахунку

напружень на твердій стінці у проекціях на осі декартової системи координат у площині

$$\begin{cases} \tilde{p}_{nx} = -\tilde{p}n_x + \frac{1}{Re} \cdot \left(n_x \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{x}} + n_y \frac{\partial \tilde{v}_x}{\partial \tilde{y}} \right); \\ \tilde{p}_{ny} = -\tilde{p}n_y + \frac{1}{Re} \cdot \left(n_x \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \tilde{x}} + n_y \frac{\partial \tilde{v}_y}{\partial \tilde{y}} \right). \end{cases} \quad (46)$$

Похідні від складових вектора швидкості, які входять до рівняння (46), визначаються у вузлах адаптованої сітки на основі формули переходу

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{J} \left(\tilde{y}_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} - \tilde{y}_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} \right); \\ \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{J} \left(-\tilde{x}_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} - \tilde{x}_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} \right). \end{cases} \quad (47)$$

Позначимо через $f(\tilde{x})$ рівняння, яке описує форму границі розрахункової області. Тоді одиничні нормаль \vec{n} та дотична $\vec{\tau}$ до $f(\tilde{x})$ легко визначаються зі співвідношень

$$\begin{cases} \vec{n} = [\vec{k} \times \vec{\tau}]; \\ \vec{\tau} = \frac{d\vec{r}}{|d\vec{r}|}, \end{cases} \quad (48)$$

де $|d\vec{r}| = \sqrt{(d\tilde{x})^2 + (d\tilde{y})^2}$; \vec{k} – одиничний вектор, перпендикулярний до площини (x, y) і спрямований уздовж осі z .

Зі співвідношення (48) для гнutoї криволінійної границі ℓ_1 матимемо

$$\begin{cases} \vec{n} = \frac{-\vec{i} f'_x + \vec{j}}{\sqrt{1+(f'_x)^2}}; \\ \vec{\tau} = \frac{\vec{i} + \vec{j} f'_x}{\sqrt{1+(f'_x)^2}}, \end{cases} \quad (49)$$

де \vec{i} та \vec{j} – орти декартової системи координат (x, y) ; $f'_x = df(\tilde{x})/d\tilde{x}$. Зазначимо, що пара векторів $(\vec{n}, \vec{\tau})$ орієнтована таким чином, щоб при безперервному русі вона збіглася з ортами (\vec{i}, \vec{j}) . На опуклій криволінійній границі ℓ_2 знаки в співвідношенні (49) повинні бути змінені на зворотні. Нормальна й тангенціальна складові вектора \vec{p}_n визначаються зі співвідношень

$$\begin{cases} \tilde{p}_{nn} = (\vec{n} \cdot \vec{p}_n) = n_x \tilde{p}_{nx} + n_y \tilde{p}_{ny}; \\ \tilde{p}_{n\tau} = (\vec{\tau} \cdot \vec{p}_n) = \tau_x \tilde{p}_{nx} + \tau_y \tilde{p}_{ny}. \end{cases} \quad (50)$$

Усі величини у правих частинах рівнянь (50) визначені з формул (46)...(49).

Усі алгоритми реалізовано у вигляді пакету підпрограм VISSIM, які за своїм призначенням можна умовно розділити на дві основні групи. До першої групи відносяться підпрограми, у яких реалізовано всі обчислювальні алгоритми:

- побудова адаптованої сітки;
- розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса;
- розв'язання рівнянь Пуассона;
- визначення напружень на поверхні, яка обтікається рідиною.

У другій групі об'єднано підпрограми графічного подання результатів у вигляді:

- ліній рівня скалярних полів з маркуванням локальних екстремумів;
- одновимірних графіків у заданому перерізі;
- поля напрямків векторних величин.

Пакет підпрограм графічної обробки розроблений на основі й за аналогією до універсального комплексу Графор [10].

Отримані результати (рис. 2-5) свідчать, що картина течії за поворотом характеризується наявністю відривної циркуляційної зони. При цьому з плином часу розміру вихрової (циркуляційної) зони зростає. Це супроводжується знесенням утворених вихорів у напрямку потоку.

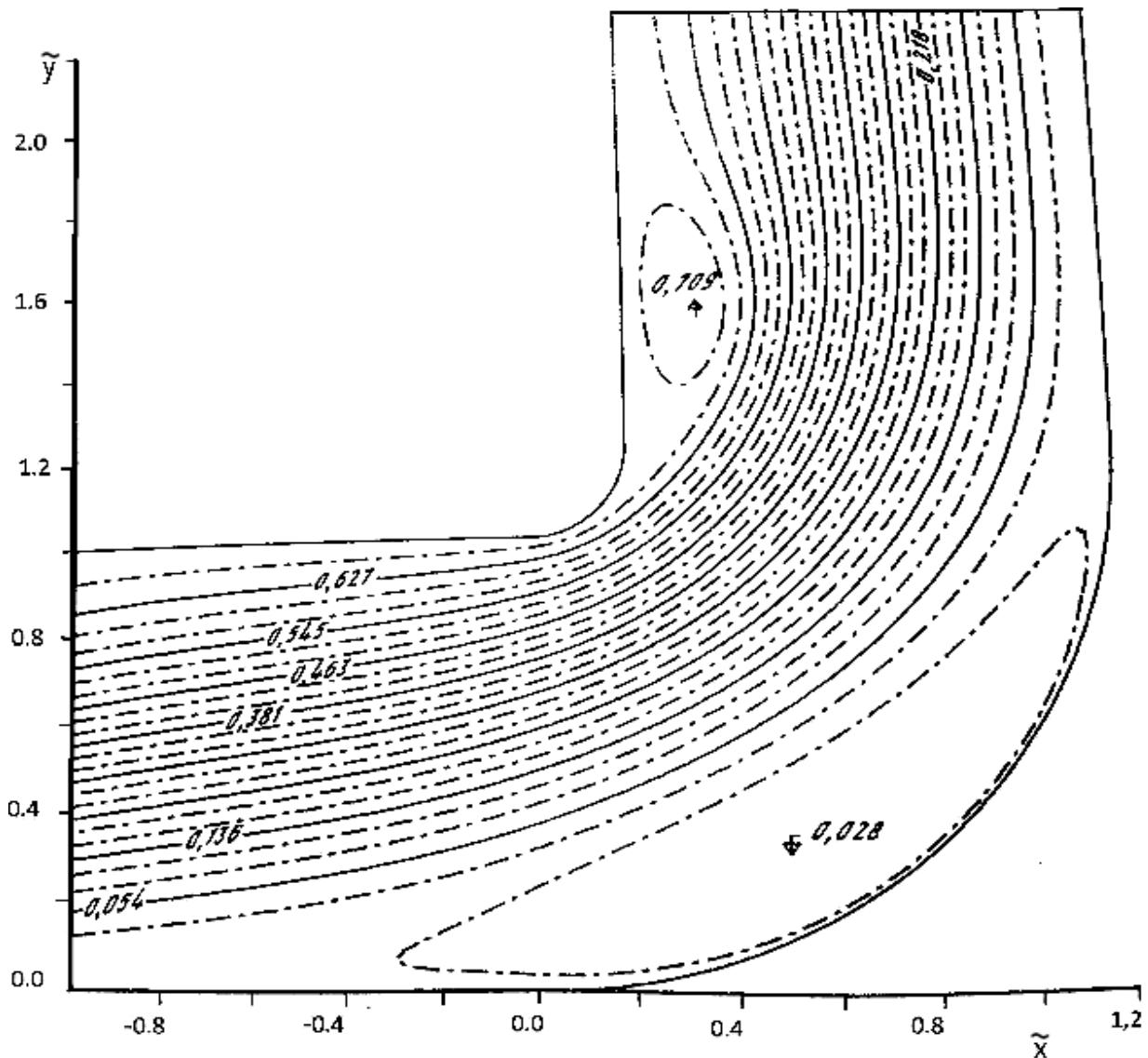
Зазначені закономірності цілком відповідають уявленням у гідродинаміці щодо особливостей обтікання опуклої криволінійної поверхні в'язкою рідиною [6].

Обтікання протилежної гнutoї поверхні також характеризується наявністю зони вихорів. Однак, на відміну від обтікання опуклої стінки утворення вихорів тут відбувається значно слабше.

Поле тисків у потоці $\tilde{p}(\tilde{x}, \tilde{y})$ для моменту часу $t = 3$ подане на рис. 6 у вигляді ізобар. Зазначимо, що в розрахунках закладено базовий рівень тиску $\tilde{p}_0 = 0$ у точці $\tilde{x} = \tilde{y} = 0$.

Як і слід було очікувати, області максимальних градієнтів тиску відповідає область інтенсивного утворення вихорів. Найбільш наочно це показано при аналізі розподілу тиску вздовж твердих стінок (рис. 7).

Розподіл тиску на гнutoї зовнішній стінці (крива 1) немонотонний, проте не відрізняється великими градієнтами впродовж стінки. Однак, у цьому випадку спостерігається відрив потоку в області, де $\partial \tilde{p}_w / \partial \ell > 0$ (рис. 4).

Рис. 2. Лінії рівня функції течії $\tilde{\Psi}$ в момент часу $\tilde{t} = 1,5$

Абсолютно інший характер має розподіл тиску на іншій стінці (крива 2 на рис. 7). Він відрізняється значними за абсолютною величиною градієнтами тиску $\partial \tilde{p}_{w2} / \partial \tilde{t}$. Наявність двох ділянок, де $\partial \tilde{p}_{w2} / \partial \tilde{t} \gg 0$ вказує на відрив потоку в цій області.

Аналогічним чином можна моделювати плоскі канали різної форми та розмірів. Розподіл тиску дозволяє виявити зони, де при нестачі гідростатичного тиску виникатиме кавітація. Це призводить до генерування шуму, вібрацій і, як результат, виникненням механічних пошкоджень. У разі виявлення подібних явищ необхідно оптимізувати форму каналу або підвищити гідростатичний тиск.

З іншого боку, модель дозволяє оптимізувати форму каналів теплообмінника

зادля збурення течії, що призводить до інтенсифікації теплообміну.

Висновки. Розглянута математична модель та схема її розв'язання дозволяють описувати рух рідини в плоских каналах теплообмінних апаратів та інших машин і пристроїв. Отримані результати моделювання відповідають сучасним уявленням гідродинаміки. Модель дозволяє візуалізувати застійні циркуляційні зони та виявити зони розрідження, де при достатній температурі та нестачі гідростатичного тиску може виникнути кавітація. Результати дозволяють оптимізувати геометричну форму каналів як задля мінімізації збурення потоку і зменшення втрати тиску, так і для штучного збурення течії та інтенсифікації теплообміну.

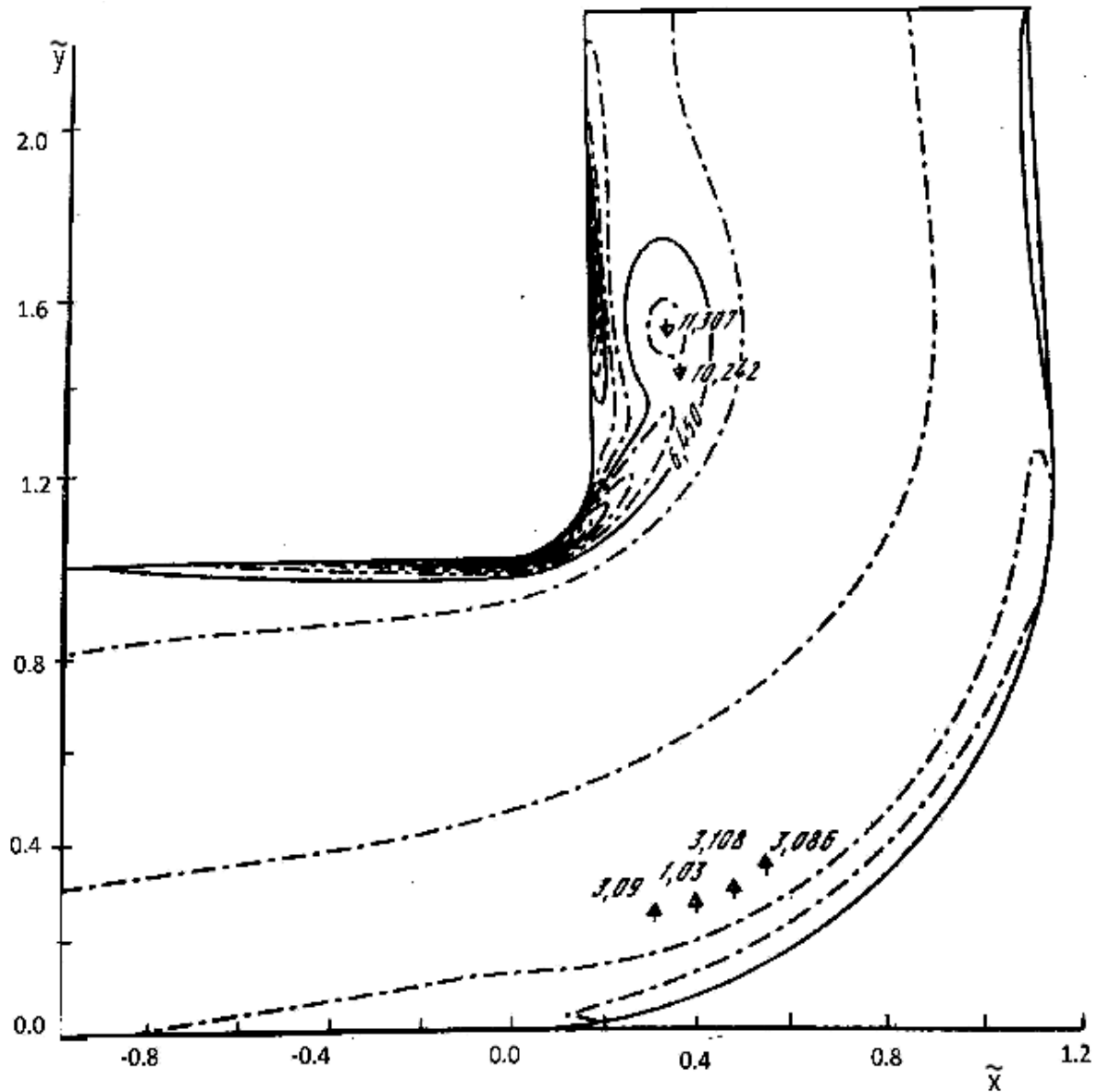


Рис. 3. Лінії рівня завихреності $\tilde{\omega}$ в момент часу $\tilde{t} = 1,5$

Література

1. Пасконов В. М. Численное моделирование процес сов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – Москва: Наука, 1984. – 288с.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – Москва: Мир, 1980. – 616с.
3. Белоцерковский О. М. Вычислительный эксперимент: прямое численное моделирование сложных течений газовой динамики на основе уравнений Эйлера, Навье-Стокса и Больцмана / О. М. Белоцерковский. – В кн.: Численные методы в динамике жидкостей. – Под ред. Вирц Г., Смолдерен Ж. М. – Москва: Мир, 1981. – 407с. – С.348-398.
4. Thompson J.F. Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies / J.F. Thompson, F.C. Thames, C.W. Mastin // Journal of Computational Physics, 1974. – Vol.15. – Iss. 3. – P. 299-319.
5. Thompson J.F., Thames F.C., Mastin C.W. TOMCAT – a code for numerical generation of boundary-fitted curvilinear coordinate systems of fields containing any number of arbitrary two-dimensional bodies / J.F. Thompson, F.C. Thames, C.W. Mastin // Journal of Computational Physics. 1977. – Vol. 24. – Iss. 3. – P. 274-302.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – Москва: Наука, 1969. – 742с.

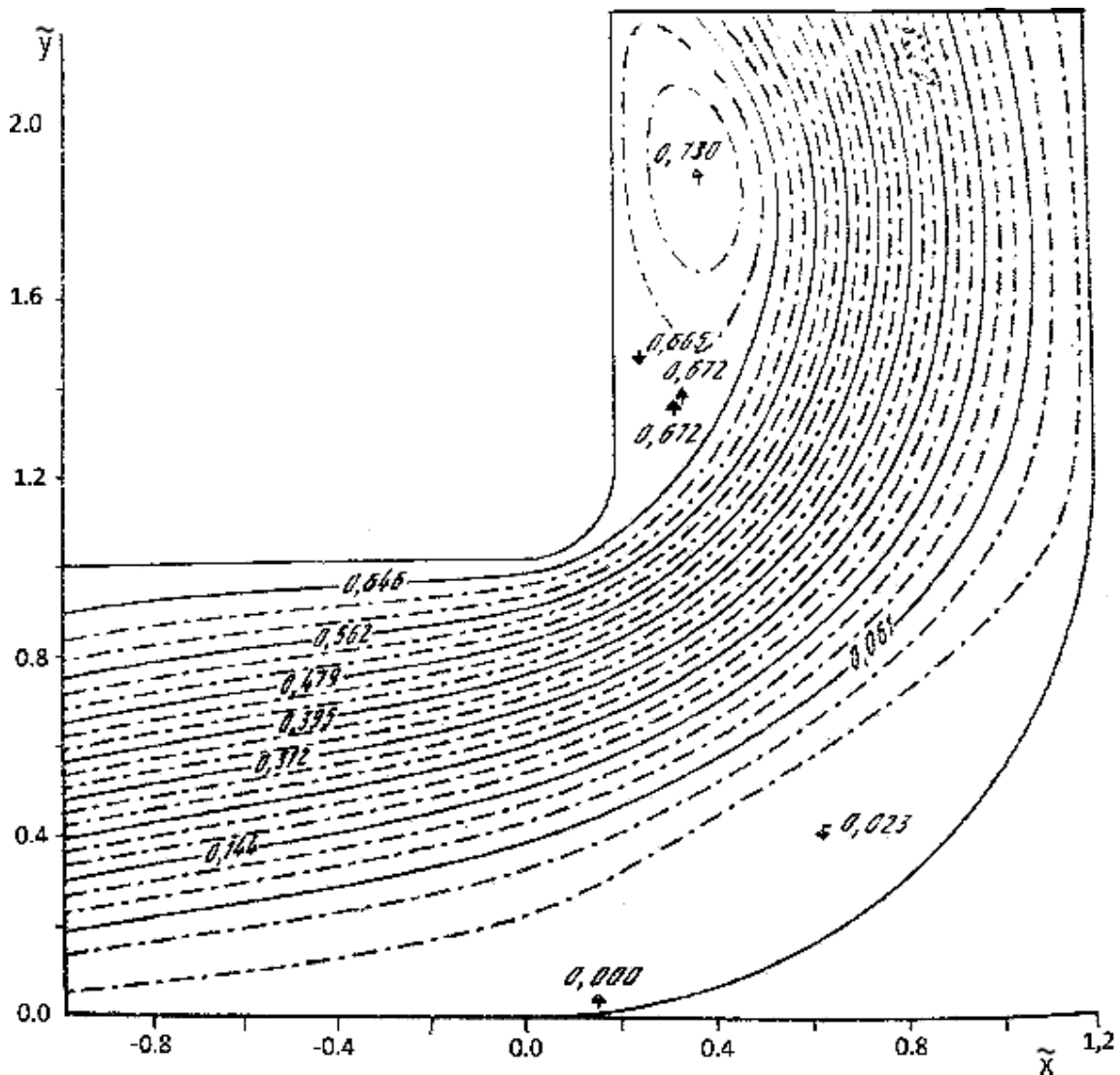


Рис. 4. Лінії рівня функції течії $\tilde{\psi}$ в момент часу $\tilde{t} = 3$

7. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – Москва: Мир, 1972. – 418 с.
8. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. – Москва: Наука. 1977. – 456 с.
9. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н. А. Слезкин. – Москва: Гостехтеоретиздат, 1955. – 519 с.
10. Базаров С. Б. Графор. Графическое расширение фортрана [Электронный ресурс] / Ю. М. Баяковский, С. Б. Базаров. – 2002. – Режим доступа: https://www.graphicon.ru/oldgr/grafor/gr_help/main.htm

References

1. Paskonov V.M., Polezhayev V.I., Chudov L.A. Chislennoye modelirovaniye protses sov teplo- i massoobmena. Nauka, 1984.
2. Rouch P. Vichislitel'naya gidrodinamika. Mir, 1980.
3. Belotserkovskii O. M. Vychislitelnyy eksperiment: priamoe chislennoe modelirovanie slozhnykh techenii gazovoi dinamiki na osnove upravlenii Eйлера, Nave-Stoksa i Boltsmana. V kn.: Chislennyye metody v dinamike zhidkosti. Mir, 1981. P. 348-398.
4. Thompson J.F., Thames F.C., Mastin C.W. "Automatic numerical generation of body-fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two-dimensional bodies". Journal of Computational Physics. 1974. Vol.15, Iss. 3. P. 299-319.

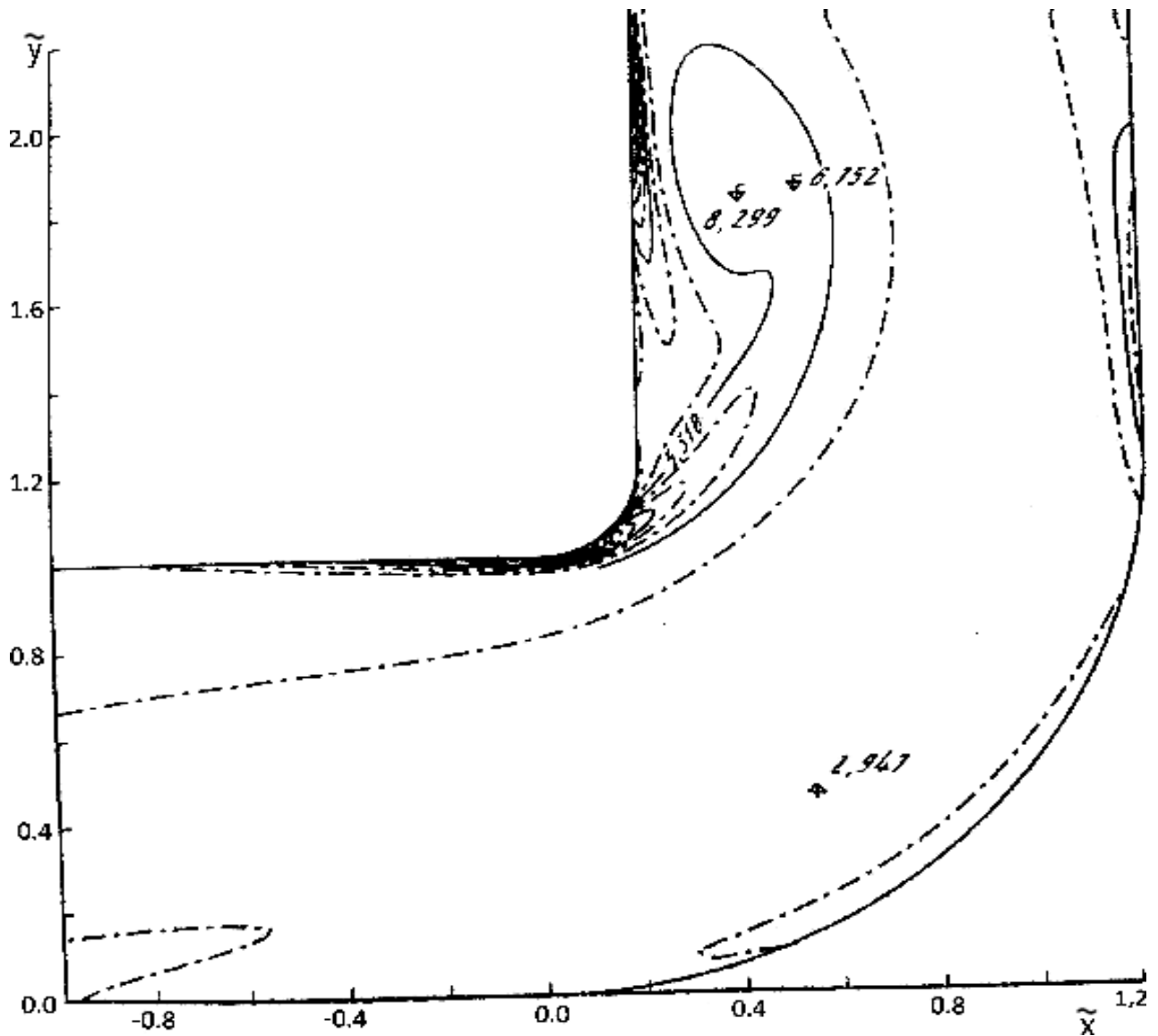


Рис. 5. Лінії рівня завихреності $\tilde{\omega}$ в момент часу $\tilde{t} = 3$

5. Thompson J.F., Thames F.C., Mastin C.W. "TOMCAT – a code for numerical generation of boundary-fitted curvilinear coordinate systems of fields containing any number of arbitrary two-dimensional bodies". Journal of Computational Physics. 1977. Vol. 24, Iss. 3. P.274-302.

6. Shlikhting G. Teoriya pogranychogo sloia. Nauka, 1969.

7. Rikhtmayyer R., Morton K. Raznostnye metody resheniia kraevykh zadach Mir, 1972.

8. Marchuk G.I. Metody vychislitelnoi matematiki. Nauka. 1977.

9. Slezkin N.A. Dinamika viazkoi neszhimaemoi zhidkosti. Gostekhteorizdat, 1955.

10. Bazarov S. B., Baiakovskii Yu. M., Grafor. Graficheskoe rasshireniie fortrana. 2002. https://www.graphicon.ru/oldgr/grafor/gr_help/main.htm

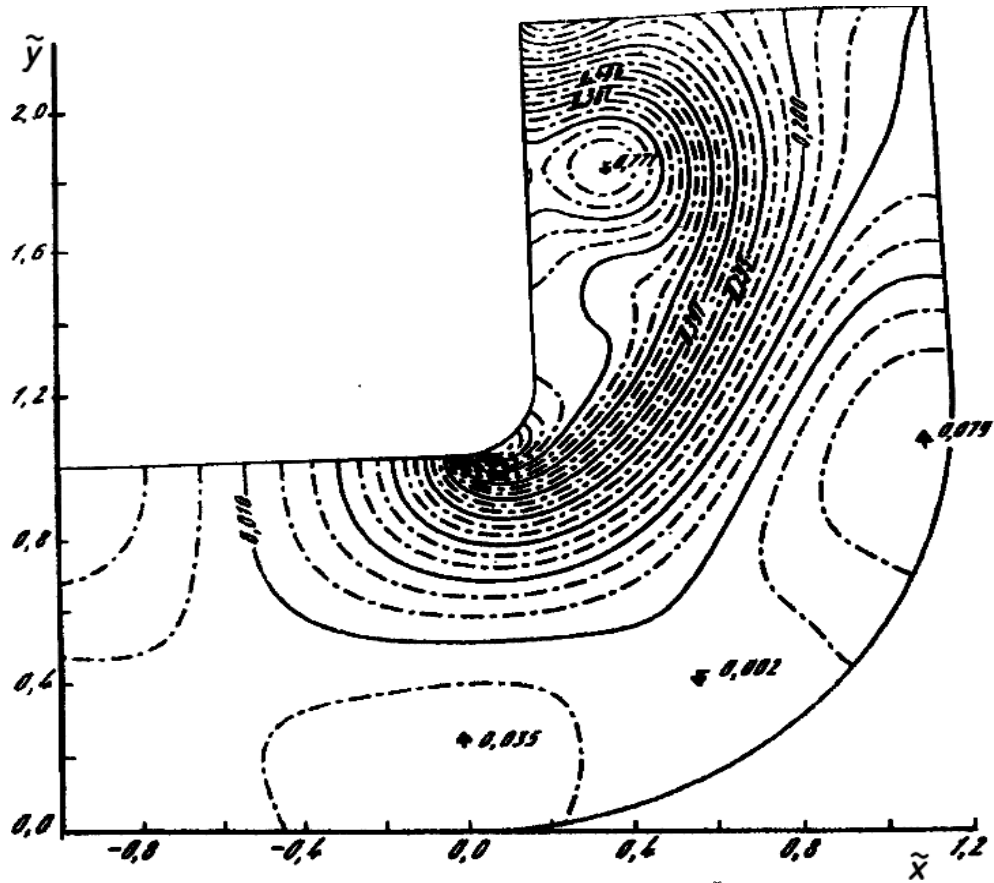


Рис.6. Поле тисків у потоці для моменту часу $\bar{t} = 3$

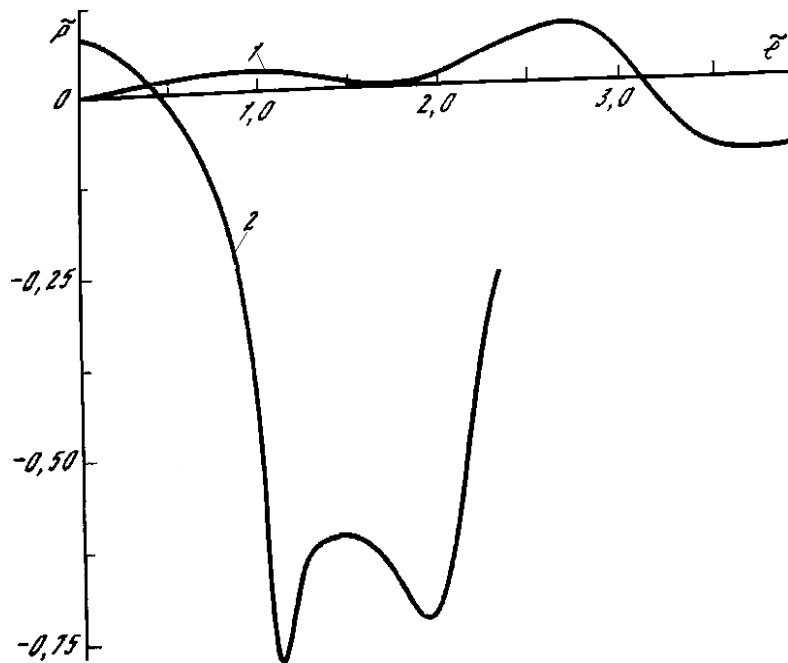


Рис.7. Розподіл безрозмірного тиску за безрозмірною довжиною $\bar{\ell} = \ell/L$ опуклої та гнutoї стінок, де ℓ – довжина відповідної стінки, м: 1 – гнута стінка; 2 – опукла стінка

УДК 532.542.1

Численное моделирование нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоских каналах произвольной формы теплообменных аппаратов

Ю. В. Човнюк¹, В. Т. Кравчук², А. С. Москвитина³, И. А. Пейфева⁴

¹к.т.н., доц. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

²к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, vtk1@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-5213-3644

³асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁴асист. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, piefteva.io@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-8858-9010

Аннотация. В данной работе описан общий метод численного решения задачи о нестационарном течении вязкой несжимаемой жидкости ((поли)этиленгликоль, глицерин) в плоских каналах произвольной формы теплообменных аппаратов. Одной из основных проблем численного решения задач математической физики является представление граничных условий для областей произвольной формы. Эффективное решение задачи достигается путём применения адаптивных сеток. Для этого находится такая система координат, не обязательно ортогональная, в которой граничные линии или поверхности расчётной области совпадают с координатными линиями или поверхностями. Математическая модель течения базируется на двухмерных уравнениях Навье-Стокса в переменных «функция течения – вихрь» и уравнении Пуассона для давления, которые решаются на основе конечно-разностного метода. Проведено численное моделирование потока жидкости в плоском криволинейном колене теплообменного аппарата при числе Рейнольдса $Re = 1000$. Данная форма соответствует наиболее характерным особенностям проточных частей различных теплообменных аппаратов, гидравлических машин, гидравлических и трубопроводных систем. Представление численных результатов осуществлено на основе пакета подпрограмм графической обработки VISSIM.

Ключевые слова: численное моделирование, нестационарная течение, вязкая несжимаемая жидкость, плоский канал, теплообменный аппарат, уравнение Навье-Стокса, уравнение Пуассона, метод адаптивных сеток.

UDC 532.542.1

Numerical simulation of unsteady flow of a viscous incompressible liquid in flat channels of arbitrary shape of heat exchangers

Yu. Chovniuk¹, V. Kravchuk², A. Moskvitina³, I. Pefteva⁴

¹PhD, associate professor. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, ychovnyuk@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-0608-0203

²PhD, professor. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine, vtk1@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-5213-3644

³Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, moskvitina.as@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0003-3352-0646

⁴Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, piefteva.io@knuba.edu.ua,
ORCID: 0000-0002-8858-9010

Abstract. Reasonable development and creation of any device in which there is an interaction between the fluid flow and the elements of the flow parts (for example, heat exchangers, transport and power machines, main pipelines), is impossible without detailed information about the characteristics of the flow, about the forces on the surfaces that are around, about vibroacoustic phenomena, etc. Among the various methods of obtaining information about the characteristics of the flow, about the forces on surfaces that are flown around, about vibroacoustic phenomena, an important role is played by theoretical methods that rely on the equation of hydrodynamics and numerous ways to solve them. In this case, the main efforts are aimed at solving the system of Navier-Stokes equations. In this paper, a general method is described for the numerical solution of the problem of unsteady flow of a viscous incompressible fluid in flat channels of an arbitrary shape of heat exchangers. An effective solution to the problem is achieved by using adaptive networks. The mathematical model of the flow is based on the two-dimensional Navier-Stokes equations in the variables "flow function - vortex" and the Poisson

equation for pressure, which are solved on the basis of the finite-difference method. A numerical simulation of the fluid flow in a flat curvilinear elbow is carried out at the Reynolds number $Re = 1000$. This form reflects the most characteristic features of the flow paths of various hydraulic machines, heat exchangers, hydraulic and pipeline systems. The presentation of the numerical results was carried out on the basis of the VISSIM graphic processing package. One of the main problems (difficulties) in the numerical solution of problems of mathematical physics is the representation of boundary conditions for regions of arbitrary shape. The implementation of various artificial methods that are now used in the approximation of both the curvilinear boundaries themselves and the boundary conditions on them can lead to significant losses in the accuracy of the solution. This is especially evident in problems in which solutions in the boundary region have maximum gradients. An effective method for solving this problem is the use of adapted grids for the computational domain. The essence of this method lies in the fact that such a coordinate system, not necessarily orthogonal, is found in which the boundary lines (surfaces) of the region coincide with the coordinate lines (surfaces). In the flat case, the computational domain is transformed into a rectangular one, and the limit curve is displayed on the sides of the rectangle. In practice, the problem of constructing an adapted mesh is reduced to finding functions that describe the mappings of the canonical (rectangular) region onto the region for which the problem was originally formulated, that is, for the two-dimensional case, the functions $x(\zeta, \eta)$, $y(\zeta, \eta)$ are determined.

Keywords: numerical modeling, unsteady flow, viscous incompressible fluid, flat channels, heat exchanger, Navier-Stokes equations, Poisson equation, adaptive mesh method.

Надійшла до редакції / Received 08.09.2020.

Канальні вентилятори змішаного типу
ВЕНТС

БУСТ

та БУСТ ЕС



Продуктивність
до 5700 м³/год



Корпус із полімеру,
зміцненого металевим
кожухом



Тришвидкісний
електродвигун



www.vents.ua

УДК 621.577

Застосування абсорбційного теплового насоса в умовах наявної теплоелектроцентралі

А. О. Редько¹, І. О. Редько², С. В. Павловський³, Ю. О. Бурда⁴, Ю. О. Півненко⁵,
С. О. Алфьоров⁶

¹ д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

² д.т.н., доц. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, germes_s2006@ukr.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

³ к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, pavlovskiy.sv1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9891-2133

⁴ к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, burda.yurii.1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-1334

⁵ к.т.н., асист. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

⁶ асп. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, sergey.alf312@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3451-1004

Анотація. Залежність людства від енергетичних ресурсів тільки збільшується із розвитком науково-технічного прогресу. Стає зрозумілим, що незабаром запас природних енергоресурсів вичерпається. Рішення полягає в застосуванні нових технологій вироблення енергії на основі альтернативних та вторинних джерел. Завдяки наявності в Україні теплоелектроцентралей існує можливість виробництва теплової енергії за рахунок використання вторинної теплоти за допомогою теплових насосів абсорбційного типу. При цьому, тепла енергія димових газів та пара з парових турбін не обігрівають атмосферу, а залучаються до вироблення теплової енергії для теплових мереж населених пунктів. Завдяки здатності розчину абсорбенту поглинати та конденсувати водяну пару під впливом низькопотенційного та високопотенційного теплоносіїв удається значно знизити споживання традиційних енергоресурсів та підвищити загальну ефективність роботи теплоелектроцентралей.

Ключові слова: теплоенергетична система, вторинні енергоресурси, енергоефективність, теплогенераційне обладнання, абсорбційний тепловий насос, абсорбційний процес, низькопотенційний теплоносій, високопотенційний теплоносій.

Вступ. Енергетична незалежність України є пріоритетним напрямком розвитку держави та основою сильної економіки. Вирішення даної проблеми потребує застосування новітніх технологій та модернізації наявних технологічних процесів, пов'язаних із виробленням теплової енергії. На сьогодні процеси генерації теплоти супроводжуються значними тепловтратами через застаріле обладнання та не оптимізовані технологічні схеми роботи теплоенергетичних систем.

Актуальність дослідження. Світовий досвід показує, що використання вторинних енергоресурсів може значно покращити енергетичний баланс країни. І головною проблемою є недостатнє споживання наявних ресурсів даного типу.

У сучасному мінливому кліматі використання відновлюваних джерел енергії пов'язано зі значними затратами та ризиками. Тому важливо звернути увагу на максимальне споживання стабільно наявних вторинних енергоресурсів.

Одним з таких потужних джерел є теплогенераційні процеси. Особливо великий обсяг таких ресурсів є у великих містах із мережами

центрального теплопостачання. Тому, підвищення ефективності роботи теплогенераційних підприємств дає змогу значно покращити енергетичний баланс усієї країни та знизити тарифи на теплову енергію для промисловості і населення, що у свою чергу дозволить підвищити рівень життя громадян.

Останні дослідження та публікації. Можливість підвищення ефективності теплогенераційних об'єктів розглядається з моменту винайдення теплогенераторів. Особливо важливим це питання постало з початку ХХ століття із активним розвитком промисловості. Тому багато науковців присвятили свої роботи даній темі [1-5].

Одним із способів досягти цього є застосування теплових насосів компресійного чи абсорбційного принципу дії. Поява абсорбційних установок зворотного циклу, які відомі вже декілька десятиліть, дозволяє витіснити дорожчі і складніші в експлуатації компресійні насоси [6].

В установках зворотного циклу відбувається зворотній до природного перебіг термодинамічних процесів, тобто передача теплоти від

більш холодної системи до більш гарячої. Для можливості реалізації цього необхідно додатково витратити енергію. У компресійних машинах зворотного циклу додаткова енергія надходить у формі роботи, в абсорбційних теплових насосах (АБТН) – теплоти.

Для збільшення ефективності абсорбційних машин можливо використовувати вторинну теплову енергію ТЕЦ, яка є дешевшою за інші джерела [7].

АБТН функціують на ТЕЦ у багатьох країнах Світу. Особливо широке поширення дані технології набули в Китаї та США.

Країни Західної Європи, Російська Федерація та Республіка Білорусь також активно впроваджують цю ідею [8-10].

Українські вчені також розглядають можливість застосування теплових насосів у енергетичному секторі держави [11, 12]. Однак, застосування АБТН в умовах наявної ТЕЦ на основі робочих параметрів не було розглянуто.

Абсорбційний тепловий насос є складною термодинамічною системою зі суміщенням прямого й зворотного циклів. Процеси і цикли АБТН здійснюються за допомогою розчину, складеного з двох або трьох компонентів. Здебільшого використовують водний розчин броміду літію.

Бінарний розчин $(\text{H}_2\text{O})+(\text{LiBr})$ розглядають як сукупність абсорбенту (поглинача) і холодоагенту (робочої речовини). При цьому холодоагентом є вода, а бромід літію – абсорбентом.

За допомогою абсорбенту реалізується прямий термодинамічний цикл. За допомогою холодоагенту виконується зворотний цикл.

Основними вимогами до абсорбенту є повна та швидка розчинність у ньому холодоагенту та значно вища нормальна температура кипіння абсорбенту порівняно з холодоагентом.

Абсорбційні теплообмінні машини поділяють на знижувальні й підвищувальні. Знижувальна є холодильною машиною, а підвищувальна працює як тепловий насос. При цьому температура джерела об'єкта повинна бути вищою за температуру джерела, що гріє [13].

При роботі підвищувального АБТН (рис. 1) вода кипить під вакуумом у випарнику за рахунок низькопотенційного теплоносія та надходить до абсорбера, де поглинається концентрованим розчином LiBr .

Розведений розчин з абсорбера відкачується до генератора. В останньому здійснюється регенерація (випарювання) поглиненої в абсорбері водяної пари за рахунок теплоти високопотенційного теплоносія.

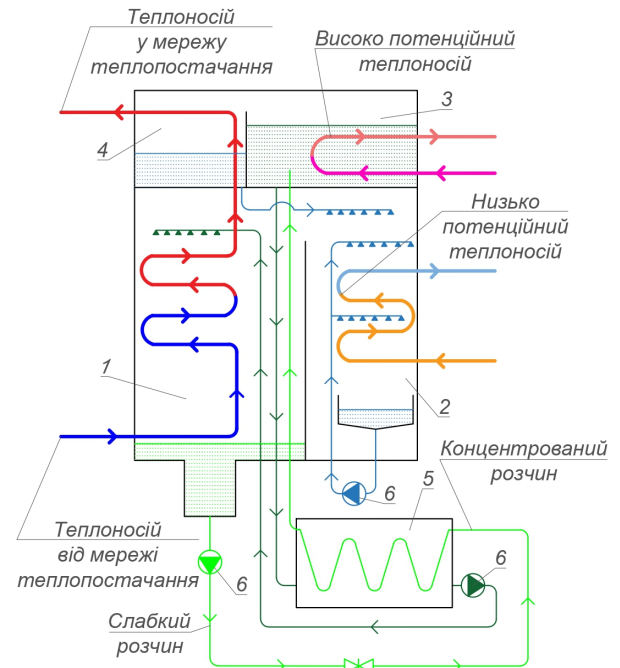


Рис. 1. Принцип дії підвищувального АБТН:
1 – абсорбер; 2 – випарник; 3 – генератор;
4 – конденсатор; 5 – теплообмінник; 6 – насос

Потік отриманої пари з генератора надходить до конденсатора, де під час конденсації нагріває теплоносій мережі теплопостачання.

Сконденсована вода повертається до випарника, а концентрований розчин LiBr до абсорбера і цикл повторюється [14].

Головним недоліком АБТН є потреба у високопотенційному та низькопотенційному джерелах енергії. Така комбінація джерел є на теплогенераційних установках, що обумовлює ефективне використання саме цього типу теплових насосів.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є аналіз можливості застосування АБТН на прикладі наявної ТЕЦ-3 м. Харкова.

Основна частина. В умовах наявної теплоелектроцентральної джерелом високопотенційної теплоти може бути пара з температурою $100\text{...}200\text{ }^\circ\text{C}$, що за робочим циклом використовується для вироблення електроенергії. Низькопотенційним теплоносієм може бути вода, нагріта відхідними газами до $20\text{...}40\text{ }^\circ\text{C}$ в економайзерах на димових трубах котлів.

Можливість застосування АБТН розглядається на прикладі наявної ТЕЦ-3 міста Харкова, Україна. Технологічна схема дозволяє впровадити АБТН із циркуляційним контуром та контур низькопотенційної енергії з економайзерами (рис. 2).

Загальна кількість теплової енергії, що виробляє ТЕЦ-3, $Q_{\text{ТЕЦ}} = 170,77\text{ МВт}$:

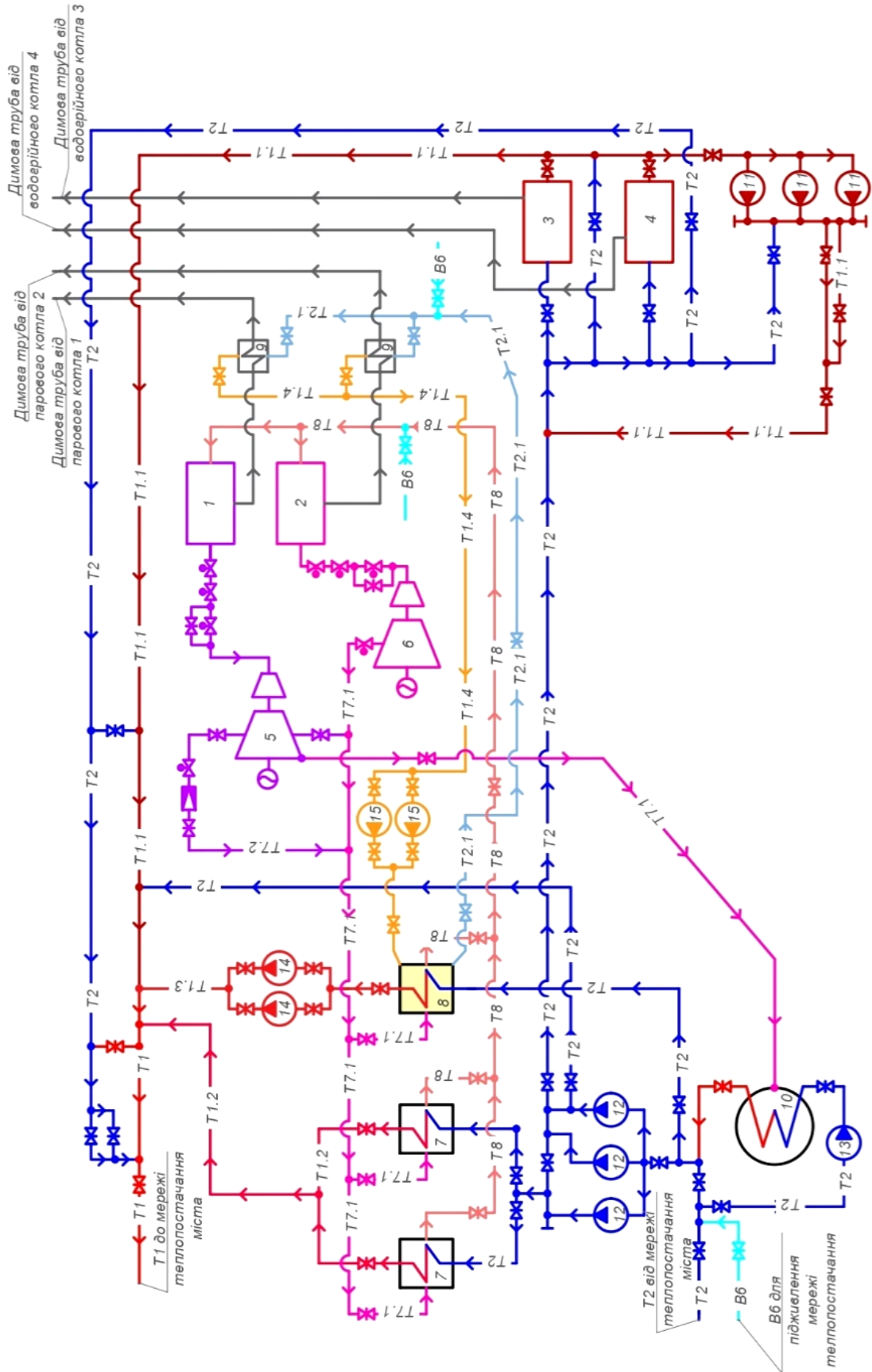


Рис. 2. Принципова тепла схема ТЕЦ з паровим підвищувальним АБТН:

1 – паровий газовий котел високого тиску ($P_{max} = 7,0$ МПа, $t_{max} = 490$ °С); 2 – паровий газовий котел середнього тиску ($P_{max} = 2,9$ МПа, $t_{max} = 370$ °С); 3, 4 – водогрійні газові котли; 5 – парова турбіна високого тиску; 6 – парова турбіна середнього тиску; 7 – пароводяні кожухотрубні теплообмінники; 8 – паровий АБТН; 9 – економайзери димових газів; 10 – градирня; 11 – циркуляційні насоси водогрійних котлів; 12 – мережеві насоси системи теплопостачання; 13 – циркуляційний насос градирні; 14 – циркуляційний насос контуру АБТН; 15 – циркуляційний насос контуру низькопотенційного теплоносія. Т1 – трубопровід подавальний мережі теплопостачання; Т1.1 – трубопровід подавальний мережі теплопостачання водогрійних газових котлів; Т1.2 – трубопровід подавальний мережі теплопостачання від пароводяних теплообмінних агрегатів; Т1.3 – трубопровід подавальний мережі теплопостачання від АБТН; Т1.4 – трубопровід подавальний контуру низькопотенційного теплоносія для АБТН; Т2 – трубопровід зворотний мережі теплопостачання; Т2.1 – трубопровід зворотний контуру низькопотенційного теплоносія для АБТН; Т7.1 – паропровід середнього тиску ($P_{max} = 2,9$ МПа); Т7.2 – паропровід високого тиску ($P_{max} = 7,0$ МПа); Т8 – конденсатопровід; В6 – виробничий водопровід пом'якшеної води

- водогрійний газовий котел (поз. 3) забезпечує 50,65 МВт теплової енергії, або 29,50 % від загальної теплопродуктивності;
- водогрійний газовий котел (поз. 4) забезпечує 49,49 МВт теплової енергії, або 28,88 % від загальної теплопродуктивності;
- один пароводяний кожухотрубний теплообмінник (поз. 7) забезпечує 23,69 МВт теплової енергії при витраті пари 38 т/год.
- три з'єднані паралельно теплообмінники виробляють 71,07 МВт або 41,62% від загальної теплопродуктивності.

Паровий підвищувальний АБТН фірми BROAD (Китай) марки 2400 згідно паспортних даних має теплову потужність 33,893 МВт при витраті насиченої пари 30,374 т/год [15]. Його теплопродуктивність на 10,20 МВт більша за кожухотрубний теплообмінник. Тому при сталій тепловій потужності ТЕЦ-3, можна зменшити теплові навантаження на водогрійні котли на це значення. При цьому витрата пари зменшиться на 7,62 т/год.

За даними експлуатаційної організації, витрата природного газу на вироблення 1 МВт теплової енергії на водогрійному котлі становить 130 $\text{нм}^3/\text{год}$, на 1 т пари витрачається 536 $\text{нм}^3/\text{год}$. Зменшення теплового навантаження на газові котли на 10,20 Вт дозволяє економити 1326 $\text{нм}^3/\text{год}$ природного газу, а зменшення виробництва пари на 7,62 т/год дає економію у 4084,32 $\text{нм}^3/\text{год}$. Загальна економія природного газу складе 5410,32 $\text{нм}^3/\text{год}$ або 10,59 % від повної витрати природного газу на ТЕЦ.

Висновки: Застосування АБТН дозволяють підвищити ефективність використання теплоти в установках генерації теплоти. Наприклад, у випадку ТЕЦ-3 м. Харкова дозволяє зменшити витрату природного газу до 11 %.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується розрахувати критичні значення робочих параметрів абсорбційних теплових насосів.

Література

1. Мартыновский В. С. Тепловые насосы / В. С. Мартыновский. – Москва : Госэнергоиздат, 1955. – 191 с.
2. Talom H. L. Heat Recovery from Automotive Engine / H. L. Talom, A. Beyene // Applied Thermal Engineering. – Vol. 29, Iss. 2–3. – 2009. – P. 439-444.
3. Рей Д. Тепловые насосы / Д. Рей. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 224 с.
4. Redko A. Low-Temperature Energy Systems with Applications of Renewable Energy / A. Redko, O. Redko, R. DiPippo. – Elsevier Science, 2019. – 394 p.
5. Романюк, В. Н. К вопросу о развитии систем теплоснабжения в Беларуси. Взгляд в ближайшее будущее и обозримую перспективу / В. Н. Романюк, Б. М. Хрусталёв, Т. В. Бубырь // Энергия и Менеджмент. – 2014. – № 4-5 – С. 2-7.
6. Редько І.О., Редько А.О., Приймак О.В., Бурда Ю.О. Підвищення ефективності систем теплогенерації центрального теплопостачання // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2019. – Вип. 28. – С. 41-47.
7. Романюк В.Н. Абсорбционные тепловые насосы в heat pipes by changes of entropy / A. Redko, N. Kulikova, S. Pavlovskiy, O. Redko // Heat Transfer Research, 2018 – Vol. 49. – № 16. – P. 1545-1557. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2018019336
11. Редько А.Ф. Сжигание твёрдого топлива в вихревой топке со встречными закрученными потоками / А.Ф. Редько, А.А. Редько, И.А. Редько // Проблемы региональной энергетики, 2017. – №3(35). – С. 33-44с.
12. Арсеньев В. М, Теплові насоси: основи теорії і розрахунку / В. М. Арсеньев, С. С. Мелейчук. – Сумський державний університет. – 2018. – 77 с.
13. Ковалев Д. В. Перспективные режимы работы генерирующего оборудования в составе белорусской энергосистемы после 2020 года / Д. В. Ковалев // Энергетическая стратегия, 2013. – № 4(40). – С. 20-23.
14. Абсорбционные технологии [Электронный ресурс] / Сервис тепло и хладооборудования. – 2020. – URL: <https://broad-ctx.by/>

References

1. Martynovskiy V. S. *Teplovye nasosy*. Gosenergoizdat, 1955.
2. Talom H. L., Beyene A. "Heat Recovery from Automotive Engine". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 29, Iss. 2–3. 2009. P. 439-444.
3. Rei D. *Teplovye nasosy*. Energoizdat, 1982.
4. Redko A. Redko O., DiPippo R. *Low-Temperature Energy Systems with Applications of Renewable Energy*. Elsevier Science, 2019.
5. Romanyuk V.N., Khrustalev B.M., Bubyр T.V. "K voprosu o razvitii sistem teplosnabzheniia v Belarusi. Vzgliag v blizhaishee budushchee i ojozrimuiu perspektivu". *Energiia i Manadziment*. 2014. № 4-5 . P. 2-7.
6. Redko I.O., Redko A.O., Priymak O.V., Burda Yu.O. "Pidvyshchennia efektyvnosti system teploheneratsii tsentrpalnoho teplopostachannia". *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplohadzopostachannia*. 2019. Vyp. 28. P. 41-47.
7. Romanyuk V.N., Bobich A.A., Muslin D.V., Kolomytskaya N.A., Malkov S.V., Bubyр T.V. "Absorbtsionnye teplovye nasosy v teplovoi skheme TETS dlia povysheniia ee energeticheskoi effektivnosti". *Energiia i Manadziment*. 2013. № 1. P. 14-19.
8. Shinsky F. *Upravlenie protsessami po kriteriiu ekonomii energii*. Mir, 1981.
9. Yanchenko I. V. *Vliianie absorbtsionnogo teplovogo nasosa na teplovuiu ekonomichnost TES i AES*. Diss. Yuzhno-Rossiiskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet (NPI) imeni M.I. Platova, 2015.
10. Redko A., Kulikova N., Pavlovskiy S., Redko O. "Simulation and optimization of heat-exchanger parameters of heat pipes by changes of entropy". *Heat Transfer Research*, 2018. Vol. 49. № 16. P. 1545-1557. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2018019336
11. Redko A.F., Redko A.A., Redko I.A. "Szhiganie tverdogo topliva v vikhrevoi topke so vstrechnymi zakruchennymi potokami". *Problemy regionalnoi energetiki*, 2017. №3(35). P. 33-44.
12. Arsenyev V. M., Meleichuk S. S. *Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku*. Sumskiy derzhavnyi universytet. 2018.
13. Kovalev D. V. "Perspektivnye rezhimy raboty generiruiushchego oborudovaniia v sostave belorusskoi energosistemy posle 2020 goda". *Energeticheskaiia strategiiia*, 2013. № 4(40). P. 20-23.
14. Absorbtsionnye tekhnologii. <https://broad-ctx.by/>

УДК 621.577

Применение абсорбционного теплового насоса в условиях действующей ТЭЦ

А. А. Редько¹, И. А. Редько², С. В. Павловский³, Ю. А. Бурда⁴, Ю. А. Пивненко⁵, С. А. Алфёров⁶

¹ д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

² д.т.н., доц. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, germes_s2006@ukr.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

³ к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, pavlovskiy.svl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9891-2133

⁴ к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, burda.yurii.1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-1334

⁵ к.т.н., асист. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

⁶ асп. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, sergey.alf312@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3451-1004

Аннотация. Зависимость человечества от энергетических ресурсов только увеличивается с развитием научно-технического прогресса. Становится понятным, что вскоре запас природных энергоресурсов иссякнет. Решение заключается в применении новых технологий выработки энергии на основе возобновляемых и вторичных источников. Благодаря наличию в Украине действующих ТЭЦ существует возможность производства тепловой энергии за счёт использования вторичной теплоты с помощью тепловых насосов абсорбционного типа. При этом, тепловая энергия дымовых газов и пара из паровых турбин не нагревает атмосферу, а используется для выработки тепловой энергии для тепловых сетей населённых пунктов. Благодаря способности раствора абсорбента поглощать и конденсировать водяной пар под воздействием низкопотенциального и высокопотенциального теплоносителей удаётся значительно снизить потребление традиционных энергоресурсов и повысить общую эффективность работы ТЭЦ.

Ключевые слова: теплоэнергетическая система, вторичные энергоресурсы, энергоэффективность, теплогенерирующее оборудование, абсорбционный тепловой насос, абсорбционный процесс, низкопотенциальный теплоноситель, высокопотенциальный теплоноситель.

UDC 621.577

Application of an absorption heat pump in the conditions of an existing combined heat and power plant

A. Redko¹, I. Redko², S. Pavlovskiy³, Y. Burda⁴, Y. Pivnenko⁵, S. Alforov⁶

¹ doctor of technical sciences, prof. Kharkov National University of Construction and Architecture, Kharkov, Ukraine, andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273

² doctor of technical sciences, associate professor, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, germes_s2006@ukr.net, ORCID:0000-0002-9863-4487

³ Ph.D assistant, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, avlovskiy.sv1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9891-2133

⁴ Ph.D assistant, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, burda.yurii.1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3470-1334

⁵ Ph.D assistant, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

⁶ Post-graduate student, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine, sergey.alf312@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3451-1004

***Annotation.** The dependence of mankind on energy resources only increases with the development of scientific and technological progress. It is clear that the supply of natural energy resources will run out soon. The solution is using new energy generation technologies based on renewable and secondary sources. Due to the presence in Ukraine of operating combined heat and power plants, there is the possibility of producing thermal energy using the secondary heat by absorption heat pumps. At the same time, the thermal energy of flue gases and steam from steam turbines does not heat the atmosphere, but are involved in the generation of thermal energy for heating networks of settlements. Due to the ability of the absorbent solution to absorb and condense water vapor under the influence of low-potential and high-potential heat carriers, it is possible to significantly reduce the consumption of traditional energy resources and increase the overall efficiency of the combined heat and power plants. World experience shows that the use of secondary energy resources can significantly improve the country's energy balance. And the main problem is the availability of these resources. In today's changing climate, the use of renewable energy sources requires additional expenses and it is appropriate to pay attention to use of present secondary energy resources, which are not used now. There are a lot of such resources available in heat generating facilities. This is especially noticeable in large cities with central heating networks. Therefore, increasing the efficiency of their work makes it possible to significantly improve the energy balance of the whole country and reduce tariffs for thermal energy for industry and individual consumers, which, in turn, will improve the living standards of citizens.*

***Keywords:** heat and power system, secondary energy, energy efficiency, heat generation equipment, absorption heat pump, absorption process, low potential heat carrier; high potential heat carrier.*

Надійшла до редакції / Received 25.05.2020.

Наукове видання

ВЕНТИЛЯЦІЯ, ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 34

Визнаний МОН України як наукове фахове видання України категорії “Б”, у якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття ступенів доктора і кандидата наук (Наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 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 (<http://vothp.knuba.edu.ua/>).

Підписано до друку 24.09.2020. Формат 60×84 1/8
Друк офсетний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. арк. 7,93. обл. вид. арк. 7,9.
Наклад 300 прим. Замовлення № 370

Надруковано в ТОВ «ТИПОГРАФІЯ «ВІД А ДО Я»
02140, Україна, м. Київ, вул. Вишняківська, 7-А, кв. 63, тел.: (044) 562-41-42

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 1844

BEHTC

КСБ



К2 ЕС



Висока
продуктивність



Звукоізований
корпус

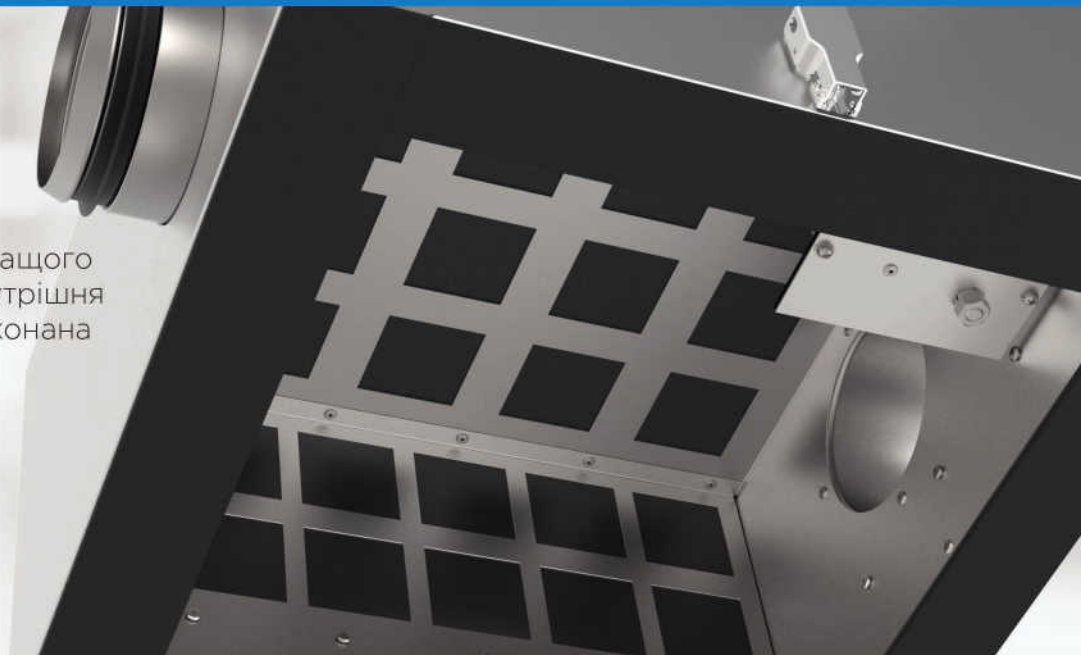


Компактні
розміри



Простий
монтаж

Для забезпечення кращого шумопоглинання внутрішня поверхня ізоляції виконана з перфорованого металевого листа



Вентилятори призначені для монтажу з круглими повітропроводами

Вентилятор може встановлюватися у будь-якому положенні з урахуванням напрямку потоку повітря

Канальні відцентрові вентилятори з ЕС-двигуном

ВЕНТС ВКП ЕС



продуктивність до
11130 м²/год

ВЕНТС ВКПІ ЕС

з тепло- та звукоізоляцією

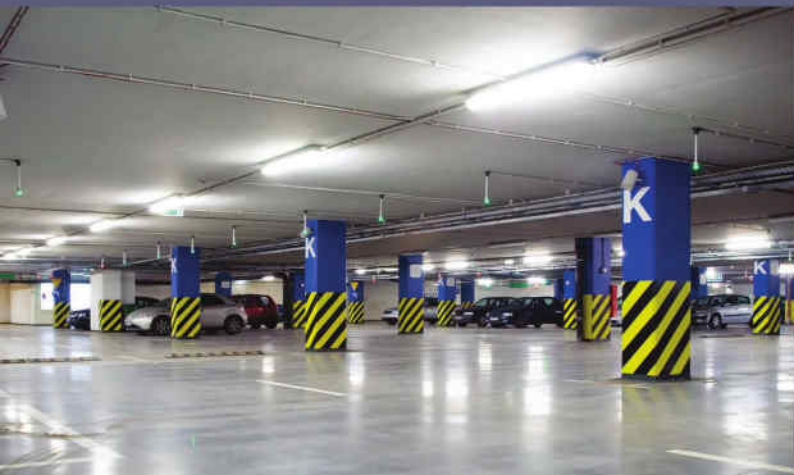
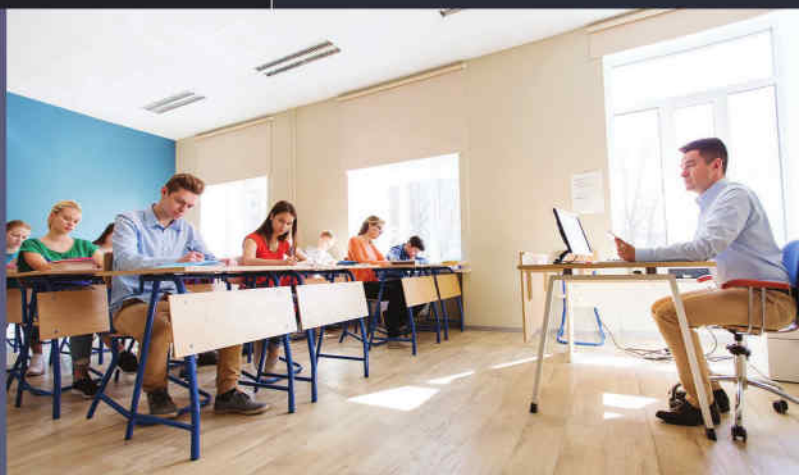


шар мінеральної вати завтовшки
50 мм

продуктивність до
11190 м²/год

Застосування

Припливно-витяжні системи вентиляції та кондиціювання приміщень різноманітного призначення, які потребують економічного рішення та керованої системи вентиляції



Монтаж

Вентилятори монтуються у розрив прямокутних повітропроводів і не потребують спеціального кріплення, якщо приєднання здійснюється безпосередньо до них



PART OF **BLAUBERG**
GROUP

СВІТОВИЙ ЛІДЕР

з вентиляційних рішень

www.vents.ua

