

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

ТИМОЩЕНКО АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 532.5:533:536.24:666.3

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ВИРОБНИЦТВА ТА ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ БАЗАЛЬТОВИХ ВОЛОКОН**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

144 – Теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, місто Київ.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
Басок Борис Іванович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач відділу теплофізичних основ
енергоощадних технологій.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, доцент,
Гаврюшенко Дмитро Анатолійович,
Київський національний Університет
імені Тараса Шевченка МОН України,
професор кафедри молекулярної фізики;

доктор технічних наук, професор,
Приймак Олександр Вікторович,
Київський національний університет
будівництва і архітектури МОН України,
декан факультету інженерних систем
та екології;

доктор технічних наук,
П'яних Костянтин Євгенович,
Інститут газу НАН України,
завідувач відділу
технологій альтернативних палив.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 10-00 годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 26.224.01 в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Марії Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ-57, вул. Марії Капніст, 2а.

Автореферат розісланий «_____» _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
доктор технічних наук



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Традиційним способом збільшення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій промислових та цивільних споруд є їх теплоізоляція. На теперішній час український ринок насичено теплоізоляційними матеріалами як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Умовно їх можна розподілити на наступні групи: мінеральні теплоізоляційні вироби; мінеральні вироби на синтетичних в'язучих; синтетичні теплоізоляційні вироби. Головні вимоги, що висуваються до теплоізоляційних виробів, полягають в їх: а) високих теплотехнічних характеристиках; б) екологічній безпеці; в) пожежній безпеці; г) довговічності; д) доступності.

Всім переліченим якостям не задовольняє на теперішній час жоден з запропонованих на вітчизняному ринку матеріалів. Більш того, синтетичні вироби та мінеральні теплоізоляційні вироби на фенол-формальдегідних в'язучих в процесі тривалої експлуатації шкідливо впливають на організм людини (знижуючи імунітет, впливаючи на процеси кровотворення), а в періоди пожеж призводять до масової загибелі людей через отруєння газоподібними продуктами термічного розкладання.

З середини 70-х років 20 століття рядом українських академічних та галузевих інститутів було розроблено та впроваджено багатостадійні теплотехнології виробництва теплозвукоізоляційних виробів на базі основних гірських порід (базальтів, діабазів, амфіболітів). Крім технологій, Україна володіє родовищами основних гірських порід з унікальними властивостями. Ця сировина характеризується рідкісним поєднанням оксидів, яке не потребує додаткового шихтування при виробництві волокна, та відносно низькою температурою плавлення 1200 ± 30 °С. Маючи цілий ряд переваг, а саме – високі теплотехнічні, екологічні, протипожежні властивості, значну довговічність, ці теплозвукоізоляційні матеріали коштовні. Внаслідок цього вони застосовуються переважно в ВПК та енергетиці. Дуже обмежена їх кількість використовується в будівництві.

Вагомий внесок в створення та розвиток галузі виробництва та використання базальтових волокон зробили вітчизняні вчені та промисловці – Трефілов В.І., Махова М.Ф., Джигирис Д.Д., Медведєв О.О., Чувашов Ю.М., Горбачов Г.Ф., Сергєєв В.П., Божко В.І., Польовий Р.П., Польовий П.П., Оснос С.П., Тимчишин В.Й., Новицький О.Г., Цибуля Ю.Л. За кордоном над цим питанням працюють – Земцов О.М., Аблесимов М.Є., Татаринцева О.С., Гутніков С.І., Шиляєв А.І., Буянтуєв С.Л., V. Brik., та ін.

Підвищення енергетичної ефективності виробництва базальтових волокон та теплової ізоляції на їх основі, шляхом системної інтенсифікації багатостадійних теплотехнологій, та її широке використання в промисловому та цивільному будівництві при умові кардинального зниження її вартості представляє собою виключно перспективну та актуальну науково-технічну проблему.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота є складовою частиною наукових досліджень, які знаходились у плані бюджетних тем № 1.7.1.696 "Дослідження зневоднення теплоізоляційних

плит на основі базальтових волокон та інших плоских матеріалів і розробка конкурентоспроможних технологій та сушарного обладнання" (0106U005456, 2006 – 2008 рр.), № 1.7.1.832 "Розробити технологію глибокого зневоднення екологічнобезпечних, вогнестійких теплоізоляційних виробів і головний зразок енергоефективної сушарки" (0109U001993, 2009 – 2011 рр.), 1.7.1.826 "Інтенсифікація тепломасообмінних процесів у технології розплавлення базальту та створення і відпрацювання головних зразків плавильних печей" (0109U001992, 2009 – 2011 рр.), 1.7.1.848 "Інтенсифікація тепломасообміну при термообробці твердих дисперсних матеріалів та виробів на їх основі" (0112U002743, 2012 – 2014 рр.), в яких автор був одним з відповідальних виконавців, і що виконувалися в Інституті технічної теплофізики НАН України.

Мета і завдання дослідження.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробці теплофізичних основ підвищення енергетичної ефективності технологій виробництва теплової ізоляції на основі базальтових волокон шляхом зниження споживання природного газу та електричної енергії, а також раціонального використання цієї ізоляції в теплоенергетиці та будівельній галузі.

Виходячи з поставленої мети, були визначені основні задачі дослідження:

- автомобільний аналіз гідродинаміки та теплообміну в приміжовому шарі рідини з урахуванням зміни в'язкості, як функції від температури та дисипативних ефектів;
- гідродинаміка та теплообмін розплаву базальту при ламінарному безнапірному стаціонарному русі з урахуванням залежності теплофізичних властивостей, як функцій від температури;
- аеродинаміка та теплообмін повітря при складному теплообміні та змішаному русі в корпусі-теплообміннику печі плавильної;
- нестационарний теплообмін в високотемпературному компактному керамічному регенеративному теплообмінному апараті;
- тепломасообмін при зневодненні жорстких (напівжорстких) плит на основі базальтових волокон;
- аеродинаміка потоку теплоносія в камері сушіння;
- натурні дослідження властивостей теплоізоляційних конструкцій, виконаних на основі базальтових волокнистих матеріалів.

Об'єкт дослідження – багатостадійні теплотехнології виробництва теплоізоляційних матеріалів на основі базальтових волокон, промислові та цивільні об'єкти (будівлі, споруди, установки).

Предмет дослідження – гідрогазодинамічні та тепломасообмінні процеси в виробках, елементах технологічного обладнання та будівельних стінових огорожувальних конструкціях.

Методи досліджень.

Теоретичні та експериментальні дослідження на моделях та лабораторних зразках, які базуються на теорії вимірювання, гідро-газодинаміки, тепломасообміну, ма-

тематичної статистики, методах комп'ютерного моделювання. Дослідження на експериментальних зразках, виготовлених в натуральну величину. Підконтрольна експлуатація дослідно-промислових зразків.

Структура та методи досліджень:

- цикл аналітичних та експериментальних досліджень на моделях та лабораторних зразках;
- цикл експериментальних досліджень в промислових умовах на зразках, виготовлених в натуральну величину;
- дослідно-промислова (натурна) підконтрольна експлуатація з відпрацюванням технологічних регламентів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень базується на використанні сучасних методів фізичного і математичного моделювання та на задовільному узгодженні результатів виконаних експериментальних досліджень і даних комп'ютерного моделювання. Достовірність наукових положень і висновків, що захищаються, підтверджується також досвідом впровадження інноваційних розробок та ноу-хау.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. В наближенні моделі примежового шару на плоскій поверхні побудовано математичну теплофізичну модель гідродинаміки і теплопереносу при течії рідини з сильною залежністю надвисокої в'язкості від температури та з урахуванням дисипативних ефектів. Одержано нові закономірності течії аномально високов'язкої рідини при температурах 900...1450 °С. Визначено умови формування шару нерухомої рідини біля твердої поверхні. Встановлено, що дисипативним доданком в автомобельному рівнянні руху для умов, що розглядалися, можна знехтувати.

2. Вперше побудовано розрахункову тривимірну модель гідродинаміки та теплообміну високов'язкого розплаву базальту при ламінарному безнапірному усталеному русі з урахуванням залежності теплофізичних властивостей, як функцій від температури. Досліджено умови утворення гарнісажного шару в фідері модульної плавильної печі.

3. Встановлено причини порушення процесів витікання розплаву та формування струмин мікронного діапазону діаметрів в пластинчастому фільєрному живильнику. Вперше встановлено діапазон допустимих величин густин теплових потоків в фідері плавильної печі, які дозволяють виключити переохолодження розплаву та досягнення ним діапазону температур, які відповідають межах кристалізації. На практиці це дозволило ефективно сформулювати вихідні дані для модернізації фідери плавильної печі та вузла кріплення пластинчастого фільєрного живильника.

4. Побудовано нову розрахункову тривимірну модель аеродинаміки та теплообміну повітря в вертикальному каналі з однобічним підведенням теплоти, складним теплообміном та змішаним природно-примусовим рухом. Модель враховує залежність теплофізичних властивостей від температури. Досліджено структуру течії в каналі. Знайдено закономірності формування полів швидкості і температури в каналі

при однобічному підводі теплоти. Визначено залежність коефіцієнтів складного теплообміну на стінках каналу від витрати повітря та його середньої температури в каналі.

5. Вперше за результатами експериментальних досліджень тепломасообміну при зневодненні жорстких (напівжорстких) плит на основі базальтових волокон та бентонітової глини визначено закономірності процесу їх сушіння. Побудовано узагальнену розрахункову залежність часу сушіння теплоізоляційних базальтових плит з бентонітовим в'язучим від швидкості сушіння в першому періоді, а також від температури, швидкості теплоносія та безрозмірних товщини та густини матеріалу. Знайдено діапазон питомих витрат енергії для зневоднення цього матеріалу.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Створено дослідно-промисловий зразок нового енергоефективного агрегату з виробництва базальтового супертонкого волокна (БСТВ) за дуплекс-технологією. Агрегат містить у своєму складі: а) дві нові уніфіковані базальтоплавильних печі ППБ-2РГ, які у порівнянні з печами першого покоління дозволили знизити витрати природного газу у 4 рази; б) дві нові уніфіковані установки для розплавлення і роздування базальтових ниток з одержанням БСТВ, які у порівнянні з установками першого покоління дозволили знизити витрату природного газу на 30%. Досягнуті результати дозволили знизити споживання природного газу на виробництво кінцевої продукції у 1,5 рази по відношенню до агрегату першого покоління.

2. Створено нову енергоефективну модульну дослідно-промислову установку виробництва базальтової безперервної комплексної нитки (дірект-ровінгу). Досягнуті результати дозволили знизити у 2 рази споживання природного газу на виробництво дірект-ровінгу по відношенню до установок модульного типу. Крім того, середня міцність елементарного базальтового волокна, одержаного на дослідно-промисловій установці, у 1,2-1,4 рази вища за аналогічний показник для елементарних волокон, одержаних на існуючих модульних установках.

3. Модернізовано конвеєрну установку для сушіння плоских напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі базальтового супертонкого волокна. Проведені роботи дозволили на 25-35% збільшити продуктивність установки по готовій продукції та на 15% знизити величину питомих енергетичних витрат на одиницю випареної вологи.

Результати дослідження впроваджено на підприємстві галузі, зокрема:

- впроваджено дослідно-промисловий зразок нового енергоефективного агрегату другого покоління з виробництва базальтового супертонкого волокна (БСТВ) за дуплекс-технологією, ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», м. Чернівці (акт впровадження від 25.11.2015 р.);

- впроваджено модернізовану конвеєрну установку для сушіння плоских напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі базальтового супертонкого волокна ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», м. Чернівці (акт впровадження від 20.12.2016 р.);

- впроваджено нову енергоефективну модульну дослідно-промислову установку виробництва базальтової безперервної комплексної нитки (дірект-ровінгу), ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», м. Чернівці (акт впровадження від 27.08.2018 р.).

Особистий внесок здобувача.

Вибір напрямків дослідження, постановка задач, розробка та формулювання теоретичних положень та інноваційних проектно-конструкторських рішень здійснювались у рівноправному співавторстві з науковим консультантом, член-кореспондентом НАН України Б.І. Баском і завідувачем лабораторії тепломасообмінних процесів і обладнання ІТТФ НАН України В.О. Кремньовим. Аналіз стану проблеми, вибір, формулювання та розробка методів дослідження, проведення та обробка аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень, аналіз результатів та формулювання висновків, опрацювання основних проектних та конструкторських рішень, тривала підконтрольна експлуатація інноваційних видів техніки належать здобувачеві.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових конференціях різного рівня, в яких здобувач брав участь у форматі:

усна доповідь на Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні екологічно безпечні тепломасообмінні процеси в технологіях легкої промисловості”, м. Київ (2006 р.); Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ (2009, 2011, 2013, 2017, 2019 рр.); I-му Міжнародному базальтовому форумі, м. Москва (2016 р.); 19th Shaoxing Overseas Talents Program Competition, Shaoxing, China (2018); 20th Shaoxing Overseas Talents Program Competition, Shaoxing, China (2018); The Third Session of Shanxi Talent Leader of Shengzhou Entrepreneurship B. Innovation Competition. Shengzhou, China (2019);

заочна участь у Міжнародних конференціях «Проблеми промислової теплотехніки», м. Київ (2011, 2019 рр.); Міжнародній конференції «Україна – Росія Сколково Єдине інноваційне просторство», м. Київ (2013 р.).

Публікації. Зміст дисертаційної роботи відображено в 43 наукових працях, зокрема, 24 публікації у наукових (в тому числі електронних) фахових виданнях України та інших держав, з яких: 5 публікацій у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до міжнародних наукометричних баз *Index Copernicus*, *РИНЦ*, *Web of Science*, *Scopus*, 17 публікацій у фахових виданнях України, та 2 публікації у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел та чотирьох додатків. Обсяг роботи становить 371 сторінку машинописного тексту, що містить 325 сторінок основної текстової частини, 165 рисунків та 46 таблиць. Перелік використаних літературних джерел містить 191 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено об'єкт, предмет, методи досліджень і задачі, які розв'язуються в роботі, відображено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, подано інформацію щодо особистого внеску здобувача, апробації, структури та обсягу роботи, представлено положення, які мають наукове й практичне значення.

Перший розділ містить огляд літературних джерел, в яких викладено відомості про напрямки робіт і досягнуті результати в галузі створення матеріалів на основі базальтових волокон. Дається характеристика базальтів, як перспективної сировини для виробництва за допомогою «високих» наукоємних технологій нової високоякісної продукції – базальтового волокна, теплозвукоізоляційних та композитних виробів на його основі. Наводиться класифікація штапельних і безперервних базальтових волокон та галузі їх застосування.

Оцінюються перспективи широкого застосування виробів на основі базальтових волокон в промисловому та цивільному будівництві. Відмічається, що на сьогодні в Україні більшість споруд не відповідають сучасним вимогам щодо теплоутримуючих властивостей. В цих умовах існуючі споруди піддають реконструкції, а у новому будівництві передбачають теплоізоляційні шари вже на стадії проектування. Проте, ці процеси мають стихійний характер і супроводжуються істотним зниженням екологічності і пожежної безпечності споруд. Наголошується, що останнім часом в ряді країн скоїлися потужні пожежі у нових багатоповерхових спорудах, та є необхідними регуляторні заходи з боку держави, спрямовані на те, що технічні рішення щодо теплоізоляції споруд не повинні спричиняти зниження їх протипожежної стійкості, принаймні, якщо мова іде про житлові або інші споруди з перебуванням людей. Водночас, теплоізоляційні матеріали здатні при їх застосуванні у спорудах не тільки не призводити до зниження їх протипожежної стійкості, а, навпаки, істотно підвищувати їх вогнестійкість. Саме до таких матеріалів належить теплоізоляція на основі базальтових супертонких волокон (БСТВ). За теплофізичними властивостями, довговічністю, стійкістю до впливу низьких та високих температур, вібрацій, екологічністю та вогнестійкістю, вироби на основі БСТВ значно перевищують аналоги. Проте, *на заваді розширення їх застосування стоїть висока собівартість.*

Розглянуто технології виробництва штапельних і безперервних базальтових волокон і теплоізоляційних виробів на їх основі. Проаналізовано причини їх високої собівартості. Відмічається, що у всіх розглянутих випадках *доля енергоносіїв (насамперед природного газу) в структурі прямих витрат на виробництво готової продукції становить 60-80%.*

Сформульовано причини високої енергоємності виробництва. *У виробництві штапельних і безперервних волокон це:* а) порушення гідравлічних, температурних та технологічних характеристик процесу в фідері печі плавильної; б) рекуперативні втрати теплоти (теплопровідністю через кладку); в) втрати теплоти з високотемпературними продуктами згоряння, в тому числі, втрати з неорганізованим газообміном, через відкриті технологічні отвори; г) регенеративні втрати теплоти, пов'язані з частими зупинками обладнання. *У виробництві плоских базальто-бентонітових виробів*

це: а) неорганізований тепломасообмін в об'ємі сушильної камери; б) некерована рециркуляція агенту сушіння та гіпервентиляція об'єму сушильної камери; в) висока температура відпрацьованого агенту сушіння; г) високі рекуперативні втрати; д) високі регенеративні втрати – для періодично діючих установок. Зазначено, що модернізація теплотехнологій, спрямована на здешевлення та забезпечення загальнодоступності якісних матеріалів на основі базальтових волокон, сприяє переходу до матеріалів з кращими механічними і теплофізичними властивостями, та потребує проведення робіт, спрямованих на модернізацію існуючих теплоізоляційних конструкцій промислових і цивільних об'єктів.

На підставі вище зазначеного виконано постановку науково-практичних задач досліджень, що створюють фундамент для інноваційної модернізації галузі та широкого використання теплової ізоляції на основі базальтових волокон.

У другому розділі досліджено гідродинаміку та теплообмін при течії рідини з суттєвою залежністю в'язкості від температури. Зокрема проведено автотельний аналіз гідродинаміки та теплообміну в примежовому шарі рідини з урахуванням залежності в'язкості від температури та дисипативних ефектів. Задача розглядалася в наближенні примежового шару (ПШ), на плоскій поверхні, при ламінарному режимі течії з застосуванням автотельного аналізу симетрій (аналіз груп Лі) гідродинаміки та теплообміну рідини. Чисельне рішення автотельної форми рівнянь руху та енергії виконувалося методом Рунге-Кутти 4-го порядку точності.

Вихідна система рівнянь гідродинаміки та теплообміну –

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

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

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2, \quad (3)$$

де u , v – компоненти швидкості, що спрямована за течією (x -компонента) та нормальна до стінки (y -компонента), відповідно; ρ , $\mu(T)$, c_p , λ – густина, в'язкість, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності. Граничні умови: а) $u = v = 0, T = T_w$ при $y = 0$; б) $u = U_\infty, T = T_\infty$ при $y \rightarrow \infty$. Індекс w характеризує умови на стінці, а індекс ∞ – умови на зовнішній границі ПШ. Для рішення системи диференціальних рівнянь з частинними похідними (1)-(3), вони перетворювалися до звичайних диференціальних рівнянь. З цією метою застосовувався аналіз симетрій (аналіз груп Лі). Після перетворень алгебр Лі система (1)-(3) представлялася у вигляді симетрій для одержання автотельних змінних –

$$q_1 = \frac{\partial}{\partial x} + F_1(x) \frac{\partial}{\partial y} + \frac{dF_1(x)}{dx} u \frac{\partial}{\partial v}, \quad (4)$$

$$q_2 = x \frac{\partial}{\partial x} + \left(\frac{1}{2} y + F_2(x) \right) \frac{\partial}{\partial y} + \left(\frac{dF_2(x)}{dx} u - \frac{1}{2} v \right) \frac{\partial}{\partial v}, \quad (5)$$

де $F_1(x), F_2(x)$ – довільні гладкі функції. Найбільш зручною симетрією для одержання автотельних змінних є друга підалгебра Лі q_2 (5), оскільки вона не містить перетворень по $u, T, \rho, \mu, c_p, \lambda$. Крім того, симетрію (5) слід скорегувати з урахуванням функціональної залежності $\mu = \mu(T)$, а одержані автотельні функції цих змінних не містять параметричних змінних, наприклад функції координати x . Це також відноситься до автотельних функцій u та T . Єдина автотельна функція, що містить

параметричну змінну, це $v(x, y)$, оскільки $v(x, y)$ входить в інфінітезимальний генератор (5). Знаходимо форму автомодельної функції V з рівняння (5), використовуючи наступне співвідношення –

$$x \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{2} v \frac{\partial V}{\partial v} = 0. \quad (6)$$

Звідки визначаємо, що $v \sim \frac{V(\eta)}{\sqrt{x}}$, де η – автомодельна змінна, що також знаходиться з рівняння (5) використовуючи вираз $-x \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{2} y \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0$. Інтегрування рівняння (6) призводить до рішення –

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_\infty \rho}{\mu_\infty x}}. \quad (7)$$

Параметр $\left(\frac{U_\infty \rho}{\mu_\infty x}\right)$ застосовується тільки для параметризації автомодельної змінної. Точний вигляд функціональної залежності для v одержується з рівняння нерозривності та наводиться нижче. Аналіз автомодельних форм проведено при умові $F_2(x) = 0$. При рішенні задачі густина середовища приймалась постійною. Швидкість u в автомодельних змінних представлена у вигляді –

$$u = U_\infty f'(\eta). \quad (8)$$

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

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_\infty \cdot \mu_\infty}{\rho \cdot x}} (f'(\eta) \cdot \eta - f(\eta)). \quad (9)$$

Вводимо автомодельну функцію для температури –

$$T = T_w + (T_\infty - T_w) \cdot \Theta(\eta), \quad (10)$$

та підставляємо рівняння (7)-(10) в рівняння (1)-(3), і одержуємо систему звичайних диференціальних рівнянь в автомодельній формі

$$\frac{1}{2} \cdot f(\eta) \cdot f''(\eta) + M'[\Theta(\eta)] \cdot \Theta'(\eta) \cdot f''(\eta) + M[\Theta(\eta)] \cdot f^{(3)}(\eta) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} \cdot Pr_\infty \cdot f(\eta) \cdot \Theta'(\eta) - Ec_\infty \cdot Pr_\infty \cdot M[\Theta(\eta)] \cdot (f''(\eta))^2 + \Theta''(\eta) = 0, \quad (12)$$

де $Pr_\infty = \frac{\mu_\infty}{a_\infty \cdot \rho_\infty}$, $Ec_\infty = \frac{U_\infty^2}{c_{p_\infty} \cdot (T_\infty - T_w)}$ числа Прандтля та Еккерта, відповідно, визначені для умов на нескінченності ($\eta \rightarrow \infty$), за межами ПШ. Залежність в'язкості рідини (ро-

зплаву базальту) від температури має вигляд $\mu(T) = 3,83 \cdot 10^{-3} \cdot e^{\frac{2,41 \cdot 10^6}{(\sqrt[4]{T})^7}}$, де μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; T – температура рідини, °С. В автомодельній формі рівняння для в'язкості представляємо у вигляді – $\mu(\Theta(\eta)) = \mu_\infty \cdot M[\Theta(\eta)]$, де μ_∞ – в'язкість рідини за межами ПШ. Система рівнянь (11), (12) розв'язується при наступних граничних умовах – $f(0) = 0, f'(0) = 0, \Theta(0) = 0$, при $\eta = 0$, та $f'(\infty) = 1, \Theta(\infty) = 1$, при $\eta \rightarrow \infty$. В чисельних розрахунках приймалося, що $\mu_\infty, a_\infty, \rho_\infty, c_{p_\infty}$ – константи, які визначаються для незбуреного потоку рідини (за межами ПШ). Чисельне моделювання руху рідини та теплообміну в примезовому шарі над плоскою поверхнею виконано в широкому діапазоні зміни параметрів μ та Θ . Чисельні рішення

одержувались за допомогою методу Рунге-Кутти 4-го порядку точності та програмних продуктів MAPLE та Mathematica. Для цього проводилася заміна змінних і виконувалися їх перетворення –

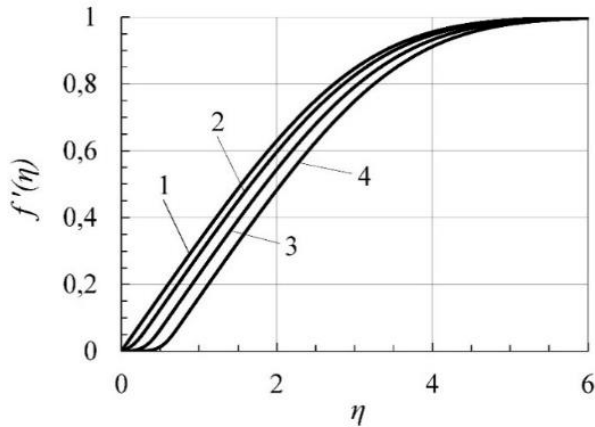


Рис. 1. Розподіл швидкості в ПШ: 1 – рішення Блазіуса; 2 – $T_w=1300$ °C; 3 – $T_w=1100$ °C; 4 – $T_w=900$ °C; $T_\infty=1450$ °C; $Pr_\infty=5180$; $Ec_\infty=10^{-14}$.

$f'(0) = y_2(0) = 0$, $\Theta(0) = t_1(0) = 0$; де величини $f''(0) = y_3(0)$ та $\Theta'(0) = t_2(0)$ визначалися методом стрільби, маючи за мету задовольнити умові $f'(\infty) = 1$, $\Theta(\infty) = 1$ при $\eta \rightarrow \infty$. Величина кроку сітки по η приймалася рівною $h = 1,0e - 06$. Підвищена в'язкість середовища та її залежність від температури на поверхні пластини істотно впливає на розподіл швидкості в примежовому шарі. Порівняння класичного рішення Блазіуса для автономної функції швидкості $f'(\eta)$ з рішенням системи рівнянь (11), (12) проведено для різних температур на поверхні стінки (Рис. 1). Добре видна деформація профілів швидкості зі зменшенням величини T_w в межах величини температурного примежового шару. Крива 1 є класичним рішенням Блазіуса, отриманим для ізотермічної течії рідини на пластині. Криві 2-4 – рішення, отримані для неізотермічної течії розплаву на пластині при різній температурі поверхні - 1300, 1100, 900 °C, відповідно. Температура розплаву і число Прандтля в незбуреному потоці $T_\infty=1450$ °C, $Pr_\infty=5180$. Прийняті умовні позначення актуальні і для подальших рисунків (Рис. 2-Рис. 5). Для обчислення величини дотичного напруження на стінці побудована залежність другої похідної автономної функції швидкості на стінці $f''(\eta)_{\eta=0}$ від температури на стінці T_w (Рис. 2). Безрозмірне дотичне напруження на стінці визначалось з виразу – $\frac{1}{2}c_f = \frac{f''(\eta)_{\eta=0}}{\sqrt{Re_x}}$. Табульовані значення $f''(\eta)_{\eta=0}$ подаються нижче (Таблиця 1).

Таблиця 1.

Залежність другої похідної автономної функції від температури стінки							
$f''(\eta)_{\eta=0}$	3,285E-05	5,108E-04	4,095E-03	2,071E-02	0,0750	0,2123	0,3291
$T_w, ^\circ C$	900	1000	1100	1200	1300	1400	1449

Розраховано залежність автономної функції температури від автономної координати (Рис. 3). Проведено порівняння класичного рішення, одержаного Лебеком, з рішенням системи рівнянь (11), (12) для декількох температур на поверхні стінки.

$$f(\eta) = y_1; \quad f'(\eta) = \frac{dy_1}{d\eta} = y_2; \quad f''(\eta) = \frac{dy_2}{d\eta} = y_3;$$

$$\Theta(\eta) = t_1; \quad \Theta'(\eta) = \frac{dt_1}{d\eta} = t_2. \quad \text{Система набувала вигляду –}$$

$$\frac{dy_1}{d\eta} = y_2, \quad (13)$$

$$\frac{dy_2}{d\eta} = y_3, \quad (14)$$

$$\frac{dy_3}{d\eta} = -\frac{1}{2M[t_1]} \cdot y_1 \cdot y_3 - \frac{M'[t_1]}{M[t_1]} \cdot t_2 \cdot y_3, \quad (15)$$

$$\frac{dt_1}{d\eta} = t_2, \quad (16)$$

$$\frac{dt_2}{d\eta} = -\frac{1}{2} \cdot Pr_\infty \cdot y_1 \cdot t_2 + Ec_\infty \cdot Pr_\infty \cdot M[t_1] \cdot y_3^2. \quad (17)$$

Система замикалася наступними граничними умовами – $\eta = 0$, $f(0) = y_1(0) = 0$,

$f'(0) = y_2(0) = 0$, $\Theta(0) = t_1(0) = 0$; де величини $f''(0) = y_3(0)$ та $\Theta'(0) = t_2(0)$ визначалися методом стрільби, маючи за мету задовольнити умові $f'(\infty) = 1$, $\Theta(\infty) = 1$ при $\eta \rightarrow \infty$. Величина кроку сітки по η приймалася рівною $h = 1,0e - 06$. Підвищена в'язкість середовища та її залежність від температури на поверхні пластини істотно впливає на розподіл швидкості в примежовому шарі. Порівняння класичного рішення Блазіуса для автономної функції швидкості $f'(\eta)$ з рішенням системи рівнянь (11), (12) проведено для різних температур на поверхні стінки (Рис. 1). Добре видна деформація профілів швидкості зі зменшенням величини T_w в межах величини температурного примежового шару. Крива 1 є класичним рішенням Блазіуса, отриманим для ізотермічної течії рідини на пластині. Криві 2-4 – рішення, отримані для неізотермічної течії розплаву на пластині при різній температурі поверхні - 1300, 1100, 900 °C, відповідно. Температура розплаву і число Прандтля в незбуреному потоці $T_\infty=1450$ °C, $Pr_\infty=5180$. Прийняті умовні позначення актуальні і для подальших рисунків (Рис. 2-Рис. 5). Для обчислення величини дотичного напруження на стінці побудована залежність другої похідної автономної функції швидкості на стінці $f''(\eta)_{\eta=0}$ від температури на стінці T_w (Рис. 2). Безрозмірне дотичне напруження на стінці визначалось з виразу – $\frac{1}{2}c_f = \frac{f''(\eta)_{\eta=0}}{\sqrt{Re_x}}$. Табульовані значення $f''(\eta)_{\eta=0}$ подаються нижче (Таблиця 1).

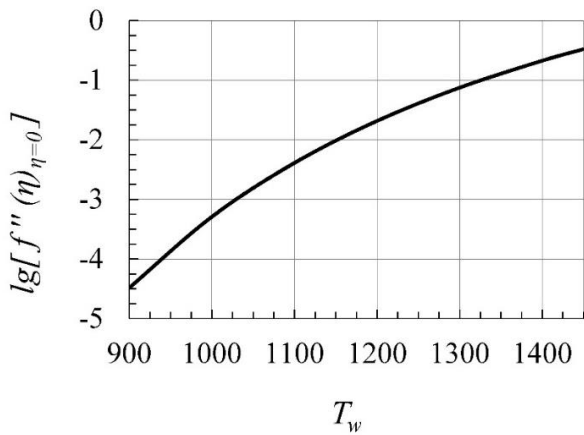


Рис. 2. Залежність другої похідної автотемпературної функції від температури на стінці T_w ($^{\circ}\text{C}$): $T_{\infty}=1450$ $^{\circ}\text{C}$; $Pr_{\infty}=5180$; $Ec_{\infty}=10^{-14}$.

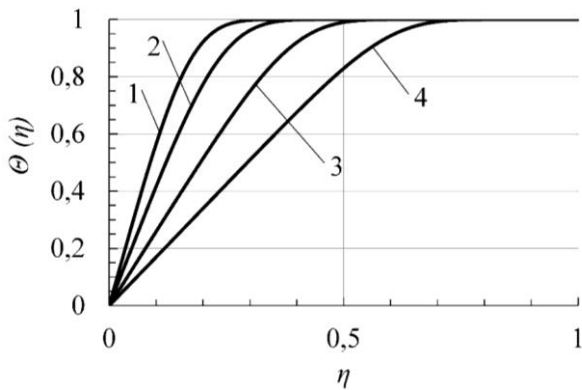


Рис. 3. Розподіл температури в температурному примежовому шарі: 1 – рішення Левека; 2 – $T_w=1300$ $^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_w=1100$ $^{\circ}\text{C}$; 4 – $T_w=900$ $^{\circ}\text{C}$; $T_{\infty}=1450$ $^{\circ}\text{C}$; $Pr_{\infty}=5180$; $Ec_{\infty}=10^{-14}$.

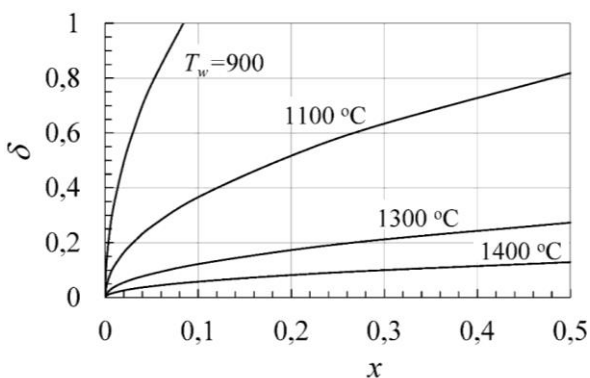


Рис. 4. Залежність товщини захисного шару (м) від координати x (м) (для різних температур на стінці T_w ($^{\circ}\text{C}$)): $T_{\infty}=1450$ $^{\circ}\text{C}$; $Pr_{\infty}=5180$; $Ec_{\infty}=10^{-14}$.

Із зменшенням температури на стінці, розподіл температури в температурному примежовому шарі наближається до лінійного, що характерно для нерухомих шарів. Поблизу плоскої поверхні з температурою $T_w < T_{\infty}$ розплав базальту формує малорухливий шар, що захищає поверхню від руйнування (серед виробників захисний шар має назву *гарнісажного шару*). В подальшому під малорухливим шаром буде розумітися шар розплаву поблизу поверхні, в якому швидкість руху середовища не перевищує 1% від величини швидкості в незбуреному потоці розплаву. Використовуючи залежність автотемпературної функції швидкості від автотемпературної координати (Рис. 1), обчислено величину захисного шару, що утворюється на плоскій поверхні, для різних температур T_w . Розрахункова область обрана з урахуванням реальних геометричних розмірів плавильних установок. Результати обчислень наводяться в графічному вигляді (Рис. 4). Слід звернути увагу, що в температурному діапазоні $T_w=900\dots1100$ $^{\circ}\text{C}$ товщина захисного шару перевершує розміри фідерів відомих плавильних печей, виходячи з чого робився висновок про недоцільність підтримки таких температур. З іншого боку, в температурному діапазоні $T_w = 1300\dots1400$ $^{\circ}\text{C}$ величина захисного шару одного порядку з геометричними розмірами фідерів в плавильних установках і достатня для виконання свого технологічного призначення. Зазначений температурний діапазон доцільно вибрати в якості визначального, при обчисленні величини густини теплового потоку на поверхні футеровки. З метою визначення інтенсивності теплообміну на пластині, обчислено залежність першої похідної автотемпературної функції температури при $\eta = 0$ від температури на поверхні стінки (Рис. 5). Традиційно, інтенсивність теплообміну на пло-

ській поверхні описується безрозмірним числом Нуссельта. Для випадку що розглядається, число Нуссельта описується виразом –

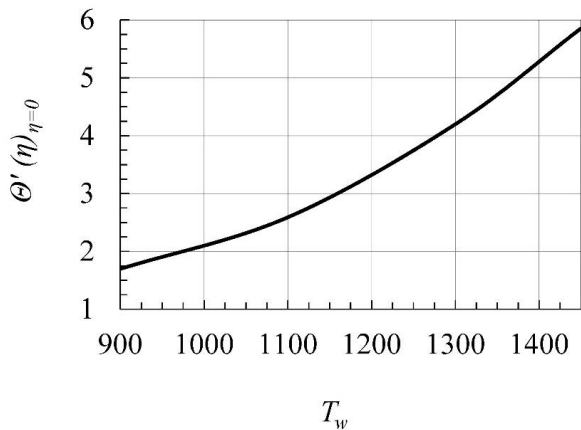


Рис. 5. Залежність першої похідної автономної функції температури від температури стінки T_w (°C): $T_\infty=1450$ °C; $Pr_\infty=5180$; $Ec_\infty=10^{-14}$.

$$Nu_x = \left(\frac{d\theta}{d\eta}\right)_{\eta=0} \cdot (Re_x)^{1/2}, \quad (18)$$

де $\left(\frac{d\theta}{d\eta}\right)_{\eta=0}$ одержано з обчислювального

експерименту та становить –

$$\left(\frac{d\theta}{d\eta}\right)_{\eta=0} = 0,218 \cdot e^{2,269 \cdot 10^{-3} T_w}. \quad (19)$$

Середня густина теплового потоку на стінці q_{ave} визначається шляхом інтегрування виразу для локальної густини теплового потоку –

$$q_x = Nu_x \cdot \left(\frac{\lambda_\infty}{x}\right) \cdot (T_\infty - T_w), \quad (20)$$

$$q_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L q_x dx. \quad (21)$$

Залежність q_{ave} від температури T_w має нелінійний характер. Одержана нелінійність

пояснюється змінами механізму теплопередачі в шарі – від переважно конвекційного (молярного) перенесення, при температурі на стінці, що наближається до температури незбуреного потоку, до переважно молекулярного перенесення, при температурах на стінці нижче 1100 °C. Практичний інтерес мають значення q_{ave} , що відповідають діапазону температур на стінці $T_w = 1300 \dots 1400$ °C. Вони дорівнюють, відповідно, $q_{ave} = 532 \dots 218$ Вт/м².

Реальна картина течії та теплообміну розплаву базальту в модульних плавильних установках обмежена кінцевими розмірами ванної та фідерної частин печей та, з огляду на їх співрозмірність з товщиною шару розплаву, розглядалася в тривимірній постановці. Досліджувалися гідродинаміка та теплообмін розплаву базальту при ламінарній безнапірній усталеній течії з урахуванням зміни його теплофізичних властивостей від температури, в ванній та фідерній частинах плавильної печі. Розплав розглядався як ньютонівська нестислива рідина, середовище розглядалося як непрозоре, дисипативні ефекти не враховувалися. Мета дослідження полягала в побудові границь гарнісажного шару в ванній та фідерній частинах печі, обчисленні значень верхньої та нижньої меж кристалізації розплаву, аналізі впливу граничних умов моделі на процеси витікання розплаву з фідерної частини печі через філь'єрний живильник при формуванні базальтових волокон. Застосовувався комбінований метод дослідження. Спочатку проводилося математичне моделювання течії та теплообміну в розплаві базальту з використанням CFD пакета в 3D постановці. Зокрема, для моделювання руху та теплообміну розплаву з вільною поверхнею використовувалась модель VOF (Volume of Fluid) в постановці Open Channel Flow. Апробація результатів дослідження проводилась на експериментальних, дослідних та головних зразках обладнання під час їх промислової підконтрольної експлуатації. Пряме вимірювання полів швидкостей та температур розплаву базальту не проводилося. Про достовірність (якісну та кількісну відповідність) результатів моделювання реальному процесу судили за непрямими ознаками: а) розмірам та структурі мінералізованого розплаву в фідері

плавильної установки; б) рівномірності витікання розплаву з фільтер (при забезпеченні рівних зовнішніх умов для витікання розплаву та формування волокна); в) за величиною розкиду та законом розподілу діаметрів безперервних базальтових волокон.

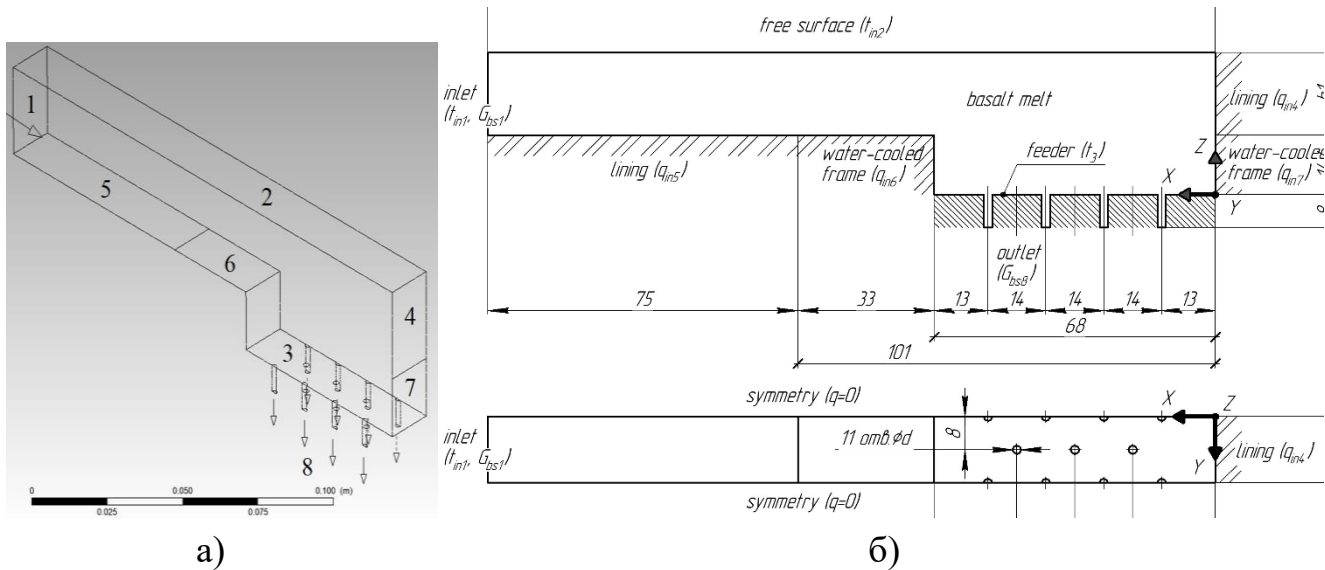


Рис. 6. Розрахункова область: а) ізометрія області: 1 – початковий переріз (вхід розплаву базальту); 2 – вільна поверхня розплаву базальту; 3 – фільтрний живильник; 4 – футеровка фідера печі; 5 – футеровка ванної печі (перелив); 6, 7 – кріплення фільтрального живильника, яке охолоджується водою; б) розміри та позначення границь моделі (мм).

В якості факторів, які впливають на об'єкт, розглядалися: а) рівень розплаву базальту над фільтрним живильником (h); б) температура розплаву на границі розрахункової області (t_{in}); в) густина теплового потоку на границях розрахункової області (q_{in}); г) масова витрата розплаву через розрахункову область (G_{bs}); д) температура поверхні пластинчастого живильника (t_3). Система рівнянь переносу при течії та теплообміні розплаву включає рівняння нерозривності для кожного з компонентів, рівняння переносу імпульсу, рівняння енергії

$$\nabla \cdot (a_q \rho_q v_q) = 0, \quad (22)$$

де a_q – об'ємна доля q компоненту, $\sum_{q=1}^n a_q = 1$, де n – кількість компонентів в розрахунковій області ($n = 2$), ρ_q , v_q – густина та швидкість q компоненту, відповідно.

Властивості матеріалів для n – компонентної системи визначались виразами

$$\rho = \sum_{q=1}^n a_q \rho_q, \quad \mu = \sum_{q=1}^n a_q \mu_q, \quad \text{та} \quad \lambda = \sum_{q=1}^n a_q \lambda_q. \quad (23)$$

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla v)] + \rho g, \quad (24)$$

Рівняння (24) пов'язано з об'ємними долями всіх компонентів через осереднені фізичні властивості (23).

$$\nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (25)$$

На границях розрахункової області (Рис. 6) задавалися граничні умови (ГУ): а) вхідний переріз (1) - масова витрата розплаву (G_{bs1}) та температура розплаву (t_{in1}); б) вільна поверхня розплаву (2) - температура поверхні (t_{in2}); в) поверхня пластинчастого фільтрального живильника (3) - температура поверхні (t_3); г) поверхня футеровки печі (4) та (5) - густина теплового потоку, відповідно, (q_{in4}) та (q_{in5}); д) елементи кріплення

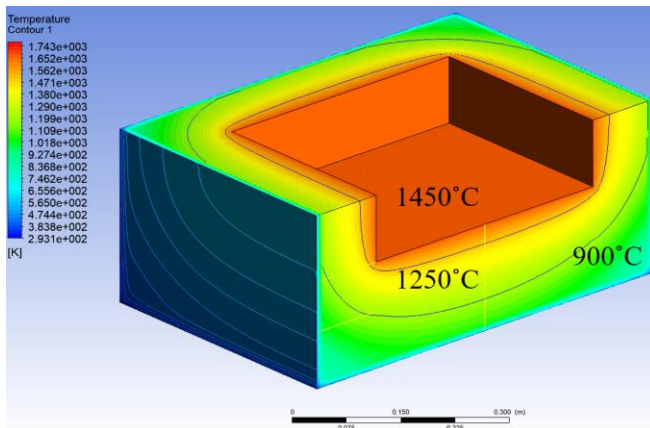
пластинчастого фільтрального живильника (6) та (7) - густина теплового потоку, відповідно, (q_{in6}) та (q_{in7}); е) вихідні отвори фільтр (8) - величина масової витрати розплаву (тотожна витраті у вхідному перерізі) (G_{bs8}); ж) на границях симетрії розрахункової області приймаються адіабатні умови. При формулюванні ГУ на границі «розплав-футеровка», розглянуто три способи охолодження печі. За результатами розрахунків одержано значення теплових потоків та розподіли температур по глибині ванни та масиву печі, встановлено вплив температури топкового простору на середню густина теплового потоку на границі.

Таблиця 2.

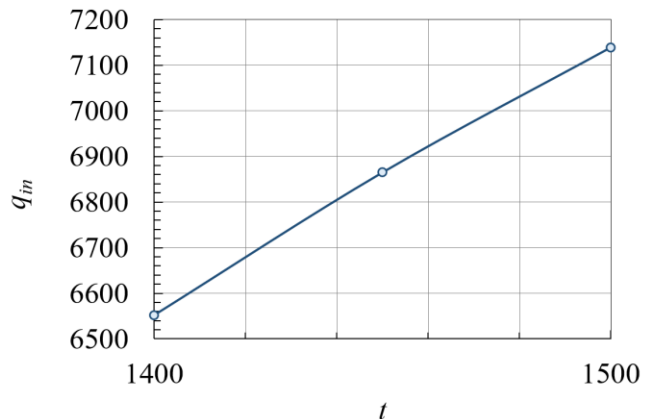
Густина теплового потоку на поверхні футеровки від способу охолодження печі плавильної (температура внутрішнього простору 1450 °С)

Спосіб охолодження	Густина теплового потоку, Вт/м ²						q_{in}^*
	відстань від бічної поверхні футеровки, м						
	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0	
Природне радіаційно-конвективне повітряне	6698	6767	7054	7187	7013	6469	6864
Примусове конвективне повітряне	5820	5890	6181	6333	6200	6076	6083
Примусове конвективне водяне	7445	7513	7800	7916	7664	6977	7553

* – середня густина теплового потоку, Вт/м²;



а)



б)

Рис. 7. Природне радіаційно-конвективне охолодження: а) ізометрія частини печі з полями температур та ізотермами, які відповідають верхній та нижній границям кристалізації; б) вплив температури топкового простору на середню густина теплового потоку: t (°С); q_{in} (Вт/м²).

Результати моделювання наводяться нижче (Рис. 8-Рис. 12). Досліджувану область з розрахованими температурним полем, ізотами 0,01 w_{ave} і 0,1 w_{ave} і границями верхньої (1250 °С) і нижньої (900 °С) меж кристалізації подано нижче (Рис. 8). Одержана картина відповідає наступним умовам проведення експерименту: а) максимальна витрата розплаву в системі, що відповідає середній швидкості в початковому перерізі $w_{ave} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м/с; б) примусове конвективне охолодження футеровки $q_{in4} = q_{in5} = 6,0$ кВт/м²; в) примусове водяне охолодження кріплення фільтрального живильника $q_{in6} = q_{in7} = 70$ кВт/м²; г) температура розплаву на границях розрахункової області $t_{in1} = t_{in2} = 1450$ °С; д) температура поверхні живильника $t_3 = 1250$ °С.

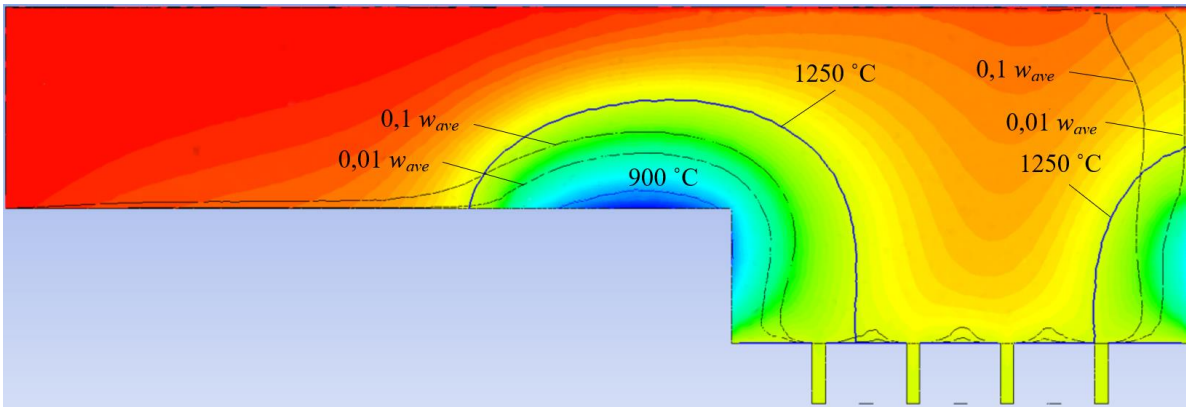


Рис. 8. Поле температур розрахункової області: $G_{max}; h_{max} = 50$ мм. Наведено розрахункову область з розташуванням та позначенням перерізів (Рис. 9).

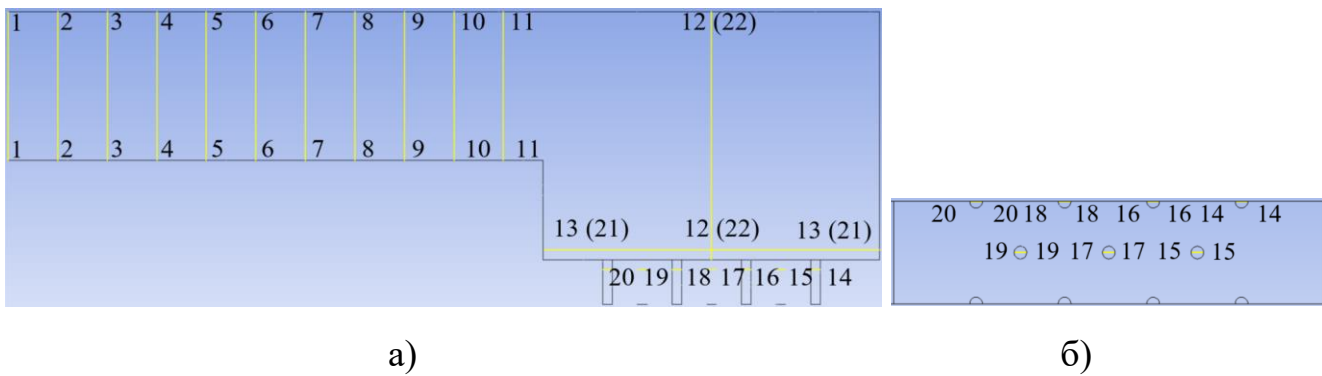


Рис. 9. Розрахункова область: а) перетини паралельні площині ZY; б) перетини паралельні площині XY та розташовані в фільтрних каналах.

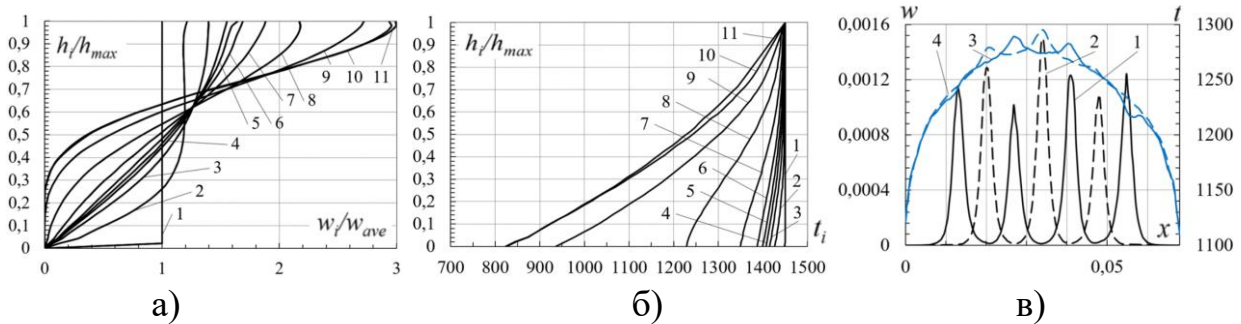


Рис. 10. Результати моделювання ($G_{max}; h_{max} = 30$ мм): швидкості (а) та температури (б) розплаву по глибині шару; (в) профілі швидкості та температури розплаву (1, 2 – профілі швидкості w (м/с), перетини 13-13 та 21-21, відповідно, ліва вісь ординат; 3, 4 – профілі температури t (°C), перетини 13-13 та 21-21, відповідно, права вісь ординат).

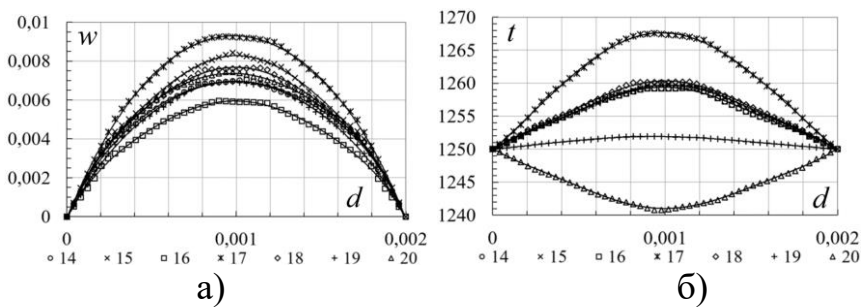


Рис. 11. Розподіл швидкостей (а) та температур (б) за перерізом фільтрного каналу.

Гарнісажний шар на поверхні вогнетривкої футеровки помітно не змінює глибини шару доступної для руху розплаву – перетини 1-1 – 7-7 (Рис. 8, Рис. 10). Охолодження футеровки призводить до значної зміни температури по глибині розплаву – перетини

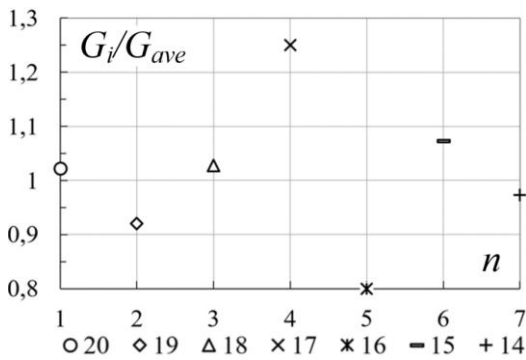


Рис. 12. Розподіл відносної витрати розплаву по рядах фільтрних каналів.

бині шару розплаву - крива $0,01w_{ave}$. Збільшується величина гідродинамічної неоднорідності, максимальне значення швидкості потоку триразово перевищує її середньомасове значення. Частина розплаву в діапазоні швидкостей $[0,01w_{ave}; 0,1w_{ave}]$ потрапляє в область між верхньою та нижньою межами кристалізації. Час перебування розплаву в зазначеній області на порядок перевищує час перебування розплаву в установці, розрахований за його середньомасовою швидкістю. Інтенсивний теплообмін в фідері печі плавильної призводить до значної термічної і гідродинамічної неоднорідності розплаву в зоні вироблення волокна (Рис. 10, в). Наслідком температурної, а за нею й в'язкостної, неоднорідності, є нерівномірна робота фільтрних каналів. Течія в них характеризується різними масовими витратами розплаву та, в тому числі, виступає джерелом різнотовщинності базальтових волокон.

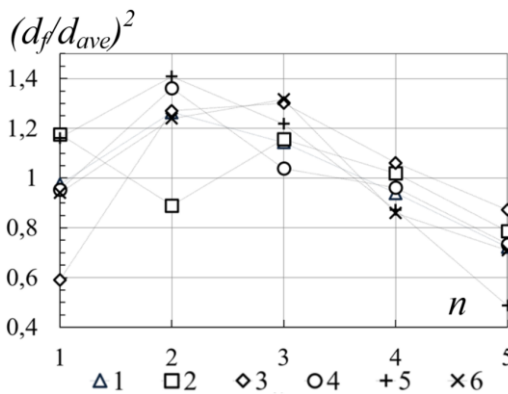


Рис. 13. Розподіл величини $\left(\frac{d_f}{d_{ave}}\right)^2$ по рядах фільтрних каналів.

Спостерігається нерівномірний розподіл масових витрат розплаву за каналами фільтрного живильника (Рис. 11, а). Відхилення масової витрати від середнього значення в меншу сторону, в перетині 16-16, дорівнює 20%, перевищення величини витрати в перетині 17-17 досягає значення 25%. Різниця температур розплаву в фільтрних каналах, між екстремальними значеннями, досягає 25-30 °С, що відповідає 1,5 кратному відношенню в'язкостей (Рис. 11, б). Спостерігається якісна аналогія між характером розподілу величини $\left(\frac{G_i}{G_{ave}}\right)$ та величини $\left(\frac{d_f}{d_{ave}}\right)^2$ (Рис. 13). Між тим, діапазон відхилення витрат середовища, обчислений через середні діаметри елементарних волокон, перевищує аналогічну величину, обумовлену температурною та гідродинамічною неоднорідністю, та складає $[-50; +40]$ %. Обидва відхилення є величинами одного порядку, виходячи з чого, стверджується, що до сукупності факторів, що впливають на стабільність технологічного процесу та однорідність ансамблю базальтових волокон, що витягуються з пластинчастого фільтрного живильника, слід

1-1 – 7-7. На довжині в 60 мм падіння температури в шарі розплаву складає 100 °С. Температурна неоднорідність призводить до гідродинамічної неоднорідності, внаслідок чого різні елементарні об'єми розплаву базальту не однаково час перебувають у ванній печі плавильної і повинні мати різну ступінь гомогенізації. Ситуація ускладнюється на водоохолоджувальних елементах кріплення фільтрного живильника в фідері печі плавильної. Спостерігається значна деформація профілів швидкості і температури - перетини 8-8 – 11-11. Значно збільшуються розміри гарнісажного шару, стаючи пропорційними гли-

додати внутрішні умови течії та теплообміну розплаву в ванній та фідері печі плави- льної.

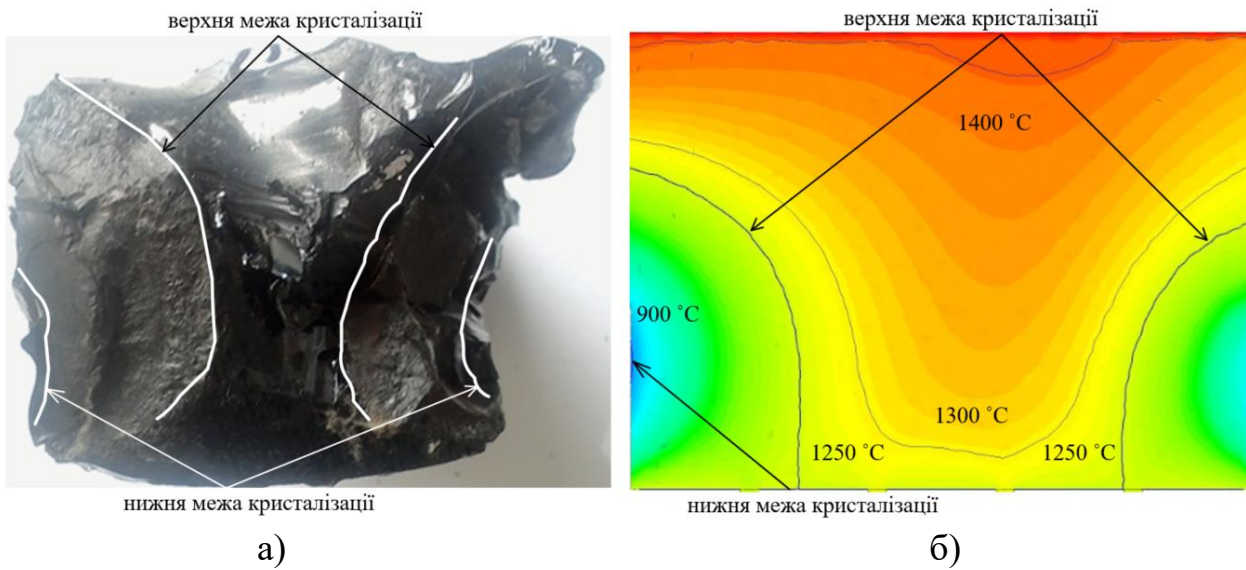


Рис. 14. Порівняння зразка базальту (а) з результатами моделювання (б).

Спостерігається якісний збіг між розрахунковими ізотермами, що характеризують нижню і верхню межі кристалізації розплаву, 900 і 1250 °С, відповідно, і кристалізованою областю розплаву на фото (Рис. 14). В обмеженій кривими області створюються умови, при яких, попередньо отримане, гомогенізоване базальтове скло піддається вторинній кристалізації. Характер і структура кристалізованої області на фото повторюють вид розрахункових ізотерм. Область розплаву в діапазоні температур від 1250 °С і вище однорідна і близька за своєю структурою до швидко охолоджених зразків розплаву. Безпосередньо на границі розділу «розплав – холодна стінка», де температура поверхні рамки була нижче 900 °С, розплав знаходиться в стані, близькому до аморфного. Співставлення зразка розплаву з результатами моделювання процесу

вказує на їх якісну і кількісну подібність, і розглядається як факт, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Результати розрахунків температури розплаву по глибині фідера (переріз 12-12, Рис. 9), для різної продуктивності установки – $0,3G_{max}$; $0,5G_{max}$; G_{max} – при інших рівних умовах ($t_{in1} = t_{in2} = 1450$ °С; $t_3 = 1250$ °С; $h_{max} = 50$ мм), наводяться нижче (Рис. 15). Як можна бачити, збільшення масової витрати розплаву змінює його температуру за глибиною фідера, відхиляючи криву розподілу температури в бік більших значень – криві 1-3. Крива 4 відповідає розподілу температури розплаву по глибині фідера при витраті $0,3G_{max}$ та збільшеній температурі топкового простору – 1500 °С. При зниженні продуктивності установки збільшення температури топ-

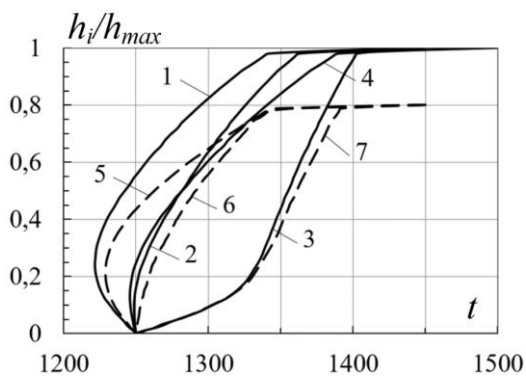


Рис. 15. Розподіл температури розплаву по висоті фідера, перетин 12-12:

- 1 - $0,3G_{max}$; 2 - $0,5G_{max}$;
- 3 - G_{max} ; 4 - $0,3G_{max}$;
- 5 - $h = 40$ мм; $0,3G_{max}$;
- 6 - $h = 40$ мм; $0,5G_{max}$;
- 7 - $h = 40$ мм; G_{max} .

кового простору сприяє збільшенню температурного рівня розплаву в фідері. Ще одним фактором, який впливає на температуру розплаву базальту, є глибина шару розплаву. Криві 5-7 відповідають розподілу температури розплаву за глибиною фідера, при рівні розплаву над фільтрним живильником 40 мм. Як можна бачити, зниження рівня розплаву на 20%, також призводить до зміщення температурних кривих в бік більших значень.

Надлишковий тиск на дні фідера, площина XOY , відповідає гідростатичному тиску стовпа розплаву базальту. В силу малих швидкостей руху розплаву, розподіл тиску по глибині фідера, перетин 22-22, від вільної поверхні розплаву ($h = 0,05$ м) до його дна ($h = 0$ м), близький до лінійного розподілу, характерного для статичної системи. Тільки поблизу від фільтрних каналів спостерігаються відхилення від лінійного закону розподілу, викликані деформацією і прискоренням потоку. Течія розплаву базальту в фільтрному каналі ($h \leq 0$ м) відповідає напірній ламінарній неізотермічній течії нестисливої рідини в трубі, де падіння тиску обумовлено силами в'язкого тертя в потоці розплаву і на поверхні каналу.

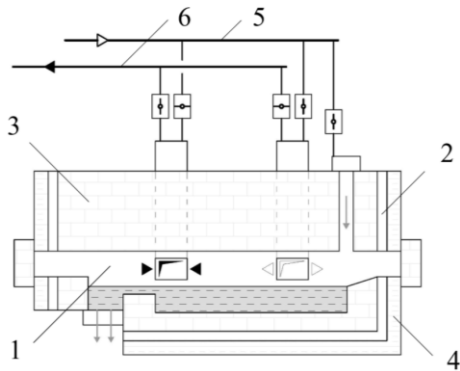


Рис. 16. Схема примусового повітряного охолодження ванної плавильної печі: 1 – внутрішній простір печі; 2 – канал повітряний; 3 – футеровка; 4 – тепла ізоляція; 5 – подача повітря; 6 – видалення продуктів згоряння.

В третьому розділі наводяться результати досліджень аеродинаміки та теплообміну повітря при складному теплообміні та змішаному русі в корпусі-теплообміннику печі плавильної. Бажання знизити теплові втрати через футеровку печі потребує перегляду існуючого способу її охолодження. Попередня оцінка інтенсивності охолодження поверхні печі проведена в розділі 2 (Таблиця 2). Встановлено, що мінімальним рекуперативним втратам відповідає примусове конвективне повітряне охолодження футеровки. Корпус печі виконується у вигляді теплообмінника, рух повітря в якому, здійснюється в прямокутному, вертикальному каналі, розташованому по периметру футеровки (Рис. 16). Джерело тепловиділення – внутрішній простір печі (1) –, знаходиться всередині корпусу-теплообмінника (2).

Теплопередача від джерела, через футеровку (3), до поверхні каналу (2) здійснюється з одного боку. Зовнішня поверхня корпусу-теплообмінника теплоізолюється (4). Мета дослідження полягала в визначенні: а) середніх температур на поверхнях каналу; б) розподілу температури повітря по довжині каналу; в) місцевих та середньоінтегральних температурних напорів по довжині каналу; г) місцевих та середньоінтегральних коефіцієнтів тепловіддачі та чисел Нуссельта на поверхнях каналу; д) розподілу тиску по довжині та повного перепаду тиску в каналі. Досліджувалась течія та теплообмін потоку повітря в горизонтальному каналі з співвідношенням сторін $a:b=1:10$, при односторонньому підводі теплоти ($q=const$) та примусовому русі. Особливості задачі полягали в: а) односторонньому підводі теплоти, внаслідок чого традиційний конвективний теплообмін в каналі ускладнюється радіаційним теплообміном між гарячою поверхнею (джерелом) та іншими поверхнями каналу, що не обігріваються; б) повітря розглядається, як діатермічне середовище; в) різноспрямованій дії векторів

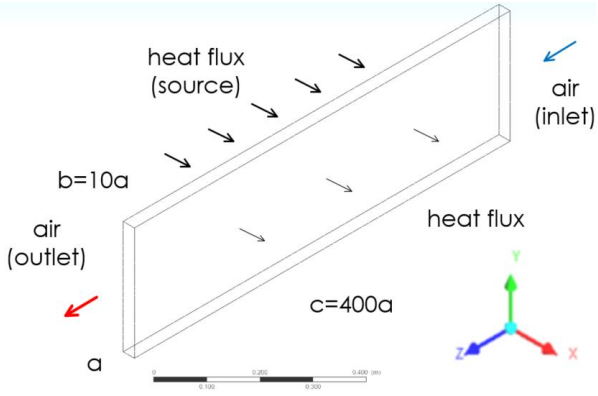


Рис. 17. Схема розрахункової області

об'ємних сил та сил тиску. Дослідження проводилось з використанням CFD пакета в 3D постановці. Зокрема, для опису радіаційного теплообміну в каналі використовувалась Surface-to-Surface (S2S) модель радіаційного теплообміну. S2S модель використовується для розрахунків радіаційного теплообміну в просторі, обмеженому сірими дифузними поверхнями. Моделювалася неізотермічна течія, розглядався турбулентний режим течії, повітря вважалось ньютонівською рідиною, враховувалась залежність теплофізичних властивостей повітря від температури. Метод дослідження базується на проведенні математичного та фізичного моделювання процесів. Чисельний експеримент проведено на тривимірній моделі, що уточнює наведені вище особливості задачі. Фізичне моделювання роботи системи повітряного охолодження проводилося на зразках, виготовлених в натуральну величину, в період дослідно-промислових випробувань обладнання.

Модель конвективного теплообміну основана на сумісному розв'язанні рівнянь нерозривності, переносу імпульсу, енергії, кінетичної енергії (k) та швидкості дисипації кінетичної енергії (ε).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (26)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \quad (27)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \quad (28)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right], \quad (29)$$

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \nu_t S^2 - \varepsilon, \quad (30)$$

$$u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (31)$$

$$c_p \rho \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (32)$$

де S – швидкість деформації потоку.

Для замикання системи рівнянь приймалася «зв'язка» Прандтля-Колмогорова $\nu_t = C_\nu \frac{k^2}{\varepsilon}$, основана на локальній аналогії з теорією однорідної та ізотропної турбулентності.

Граничні умови:

$$1) x = -\frac{a}{2}; y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]; z \in [0; c] \quad q_0 = -\lambda_{air} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=-\frac{a}{2}} + q_{rad, -\frac{a}{2}};$$

$$2) x = \frac{a}{2}; y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]; z \in [0; c] \quad 0 = -\lambda_{air} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\frac{a}{2}} - q_{rad, \frac{a}{2}};$$

$$3) x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right]; y = \frac{b}{2}; z \in [0; c] \quad 0 = -\lambda_{air} \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=\frac{b}{2}} - q_{rad, \frac{b}{2}};$$

$$4) x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right]; y = -\frac{b}{2}; z \in [0; c] \quad 0 = -\lambda_{air} \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=-\frac{b}{2}} - q_{rad, -\frac{b}{2}};$$

$$5) x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right]; y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]; z = 0; G_{inlet} = G_0; T = T_{inlet}; u = v = 0;$$

$$6) x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2}\right]; y \in \left[-\frac{b}{2}; \frac{b}{2}\right]; z = c; p = 0; G_{outlet} = G_{inlet}; u = v = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=c} = 0.$$

Методика обробки результатів дослідження. Середній коефіцієнт тепловіддачі з поверхні каналу в i -му перерізі: $\alpha = \frac{\bar{q}_w}{(\bar{t}_w - \bar{t}_a)}$, де \bar{q}_w – середня густина теплового потоку

на стінці, $\bar{q}_w = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{b/2} q_w(y) dy$. Локальна густина теплового потоку на стінці $q_w(y)$ в i -му перерізі визначалася з математичного експерименту. Середня температура стінки $\bar{t}_w = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{b/2} t_w(y) dy$, де $t_w(y)$ – локальна температура стінки в i -му перерізі, що

визначалася з математичного експерименту. Середня масова температура повітря $\bar{t}_a = \frac{\int_f \rho w t_a df}{\int_f \rho w df}$, де величини ρ, w, t_a визначалися з математичного експерименту. Се-

редня масова швидкість потоку $\bar{w} = \frac{\int_f \rho w df}{\int_f \rho df}$. Середній інтегральний коефіцієнт теп-

ловіддачі по довжині розрахункової області $\bar{\alpha} = \frac{1}{c} \int_0^c \alpha(z) dz$, де $\alpha(z)$ – середній коефіцієнт тепловіддачі з поверхні каналу, c – довжина каналу. Середній інтегральний температурний напір $\bar{\Delta t} = \frac{1}{c} \int_0^c (\bar{t}_w(z) - \bar{t}_a(z)) dz$. Середня інтегральна температура

повітря $\bar{t}_{air} = \frac{1}{c} \int_0^c \bar{t}_a(z) dz$. Безрозмірний середній інтегральний температурний на-

пір $\bar{\Theta} = \frac{\bar{\Delta t}}{\bar{t}_{air}} = \frac{\int_0^c (\bar{t}_w(z) - \bar{t}_a(z)) dz}{\int_0^c \bar{t}_a(z) dz}$. Для аналізу та порівняння результатів експерименту з

відомими результатами з конвективного теплообміну в трубах при турбулентній течії, вони представлялися в критеріальному вигляді. Теплофізичні властивості, які входять до складу безрозмірних комплексів, визначалися для середньої масової температури потоку в даному перерізі. В якості характерного лінійного розміру поперечного перерізу каналу використовувався гідравлічний діаметр. Вплив вільної та примусової конвекції на інтенсивність теплообміну визначався з використанням комплексів $Ra = Gr \cdot Pr$ та $Pe = Re \cdot Pr$, відповідно. Інтенсивність теплообміну в безрозмірному вигляді представлялася числом Нуссельта $Nu = \alpha \cdot \frac{X}{\lambda}$. Криві, що узагальнюють ре-

зультати експериментального дослідження, представлялися в системі координат $Z - Nu$. Безрозмірна локальна координата $Z = Re \cdot Pr \cdot \frac{X}{\lambda}$, де X – характерний лінійний

розмір каналу; z – координата перерізу на вісі (OZ). Узагальнення середніх інтегральних результатів експериментального дослідження проводилось в системі координат $\bar{Z} - \bar{Nu}$. Середня безрозмірна координата $\bar{Z} = \overline{Re} \cdot \overline{Pr} \cdot \frac{x}{c}$, де \overline{Re} – середнє інтегральне число Рейнольдса по довжині розрахункової області $\overline{Re} = \frac{1}{c} \int_0^c Re(z) dz$. Локальне число Рейнольдса $Re(z)$ обчислювалося за результатами експерименту. При обчисленні використовувалися середні масові значення швидкості та температури потоку. Середнє інтегральне число Прандтля по довжині розрахункової області \overline{Pr} , визначалося за аналогією з числом Re .

Верифікація адекватності побудованої моделі проводилась через тестове дослідження, в якому для описаної геометрії каналу визначалася інтенсивність конвективного теплообміну в каналі при турбулентній течії потоку, двобічному підведенні теплоти та граничних умовах 2-го роду. Радіаційний теплообмін в каналі не враховувався. Інші характеристики моделі тестового дослідження відповідали величинам, прийнятим для основного дослідження. Густина теплового потоку для двобічного підведення теплоти вибиралася за умовою $q_1 = 0,5q_0$, де q_0 – густина теплового потоку для однобічного підведення теплоти. Результати тестового дослідження представлялися в узагальненому вигляді ($\bar{Z} - \bar{Nu}$), та порівнювалися з існуючими результатами дослідження конвективного теплообміну в трубах при турбулентній течії та невеликих густинах теплових потоків, коли ще відсутній вплив на теплообмін неізотермічності через природню конвекцію та змінність властивостей теплоносія –

$$\bar{Nu} = \frac{(\xi/8)\overline{Re} \cdot \overline{Pr}}{K_1 + K_2 \sqrt{\frac{\xi}{8}(\overline{Pr}^2 - 1)}}, \quad (33)$$

де $K_1 = 1 + \frac{900}{Re}$, $K_2 = 12,7$. Коефіцієнт гідравлічного опору тертя розраховувався за залежністю –

$$\xi = (1,82 \lg(\overline{Re}) - 1,64)^{-2}. \quad (34)$$

Границі застосування формул (33), (34): $Re = 4 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6$; $Pr = 0,5 \div 5,0$.

Таблиця 3.

Умовні позначення експериментів

Густина теплового потоку, Вт/м ²	Масова витрата повітря, кг/год			Примітка
	100	150	200	
Однобічне підведення теплоти				
5000	5000_100_1	5000_150_1	5000_200_1	1
	5000_100_2	5000_150_2	5000_200_2	2
5500	5500_100_1	5500_150_1	5500_200_1	1
	5500_100_2	5500_150_2	5500_200_2	2
6000	6000_100_1	6000_150_1	6000_200_1	1
	6000_100_2	6000_150_2	6000_200_2	2
1 - гаряча поверхня; 2 - поверхня, що не обігрівається				

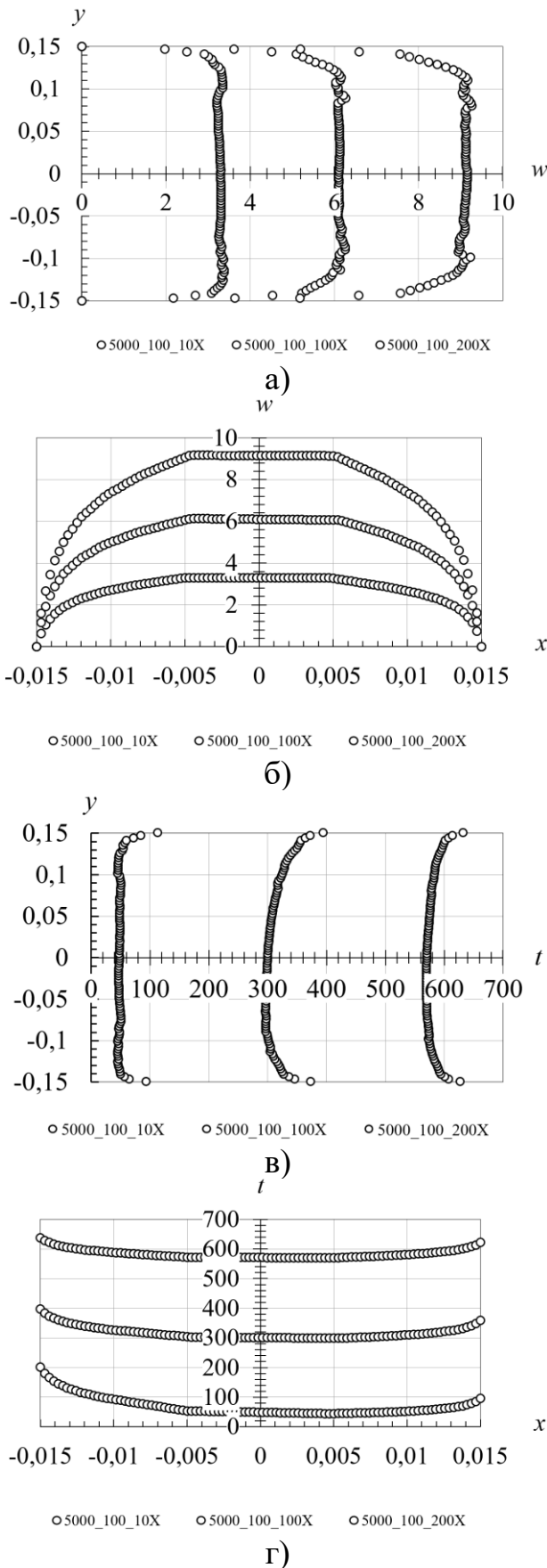


Рис. 18. Профілі швидкостей та температур повітря: (а), (в) в вертикальній центральній площині (ZOY); (б), (г) в горизонтальній центральній площині (ZOX).

Втрати тиску в каналі визначалися з використанням формули Дарсі - Вейсбаха – $\Delta p = \bar{\xi} \cdot \frac{L}{X} \cdot \frac{\rho \cdot \bar{w}^2}{2}$, де Δp – втрати тиску в каналі, обумовлені тертям, Па; L – довжина каналу, м; X – характерний лінійний розмір каналу, в нашому випадку гідравлічний діаметр каналу, м; $\bar{\xi}$ – середній коефіцієнт опору тертя. $\bar{\xi} = \frac{8 \cdot \bar{\tau}_w}{\rho \cdot \bar{w}^2}$, де $\bar{\tau}_w$ – середнє дотичне напруження на стінці каналу, Па, визначається з експерименту для гарячої поверхні та поверхні, що не обігривається. Позначення експериментів, подані вище (Таблиця 3), використовуються як підписи в умовних позначеннях рисунків (Рис. 18-Рис. 23). Нижче (Рис. 18) наводяться розподіли швидкостей та температур в потоці повітря, в вертикальній (ZOY) та горизонтальній (ZOX) центральних площинах каналу. Профілі побудовано для площин, розташованих на відстані 10, 100 та 200 калібрів від площини входу. В якості калібру прийнята величина гідравлічного діаметру каналу (X). Спостерігається несиметричність профілів температури відносно центральних площин симетрії каналу. В центральній частині каналу для вертикальних профілів температури спостерігається вплив вільної конвекції – профілі більш заповнені, ніж в нижній частині, нижче площини симетрії. Із збільшенням температури повітря, знижується величина різниці температур між поверхнями каналу. Температура поверхні джерела (при односторонньому підводі теплоти) вища температури поверхні, що не обігривається по всій довжині каналу. По периметру перерізу каналу температура його поверхні має неоднакове значення, як наслідок – відрізняються локальні по периметру каналу коефіцієнти тепловіддачі.

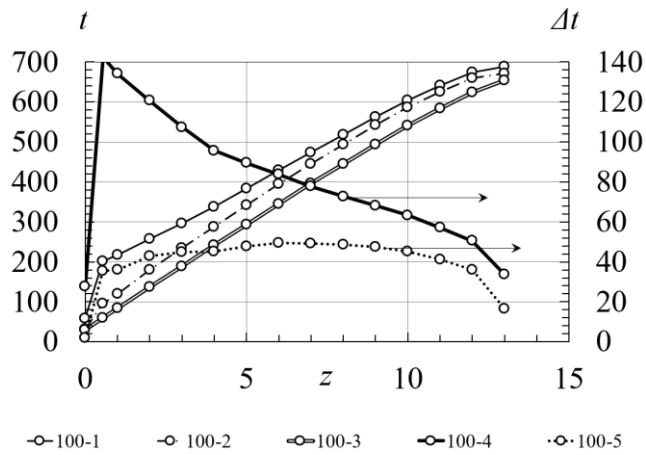
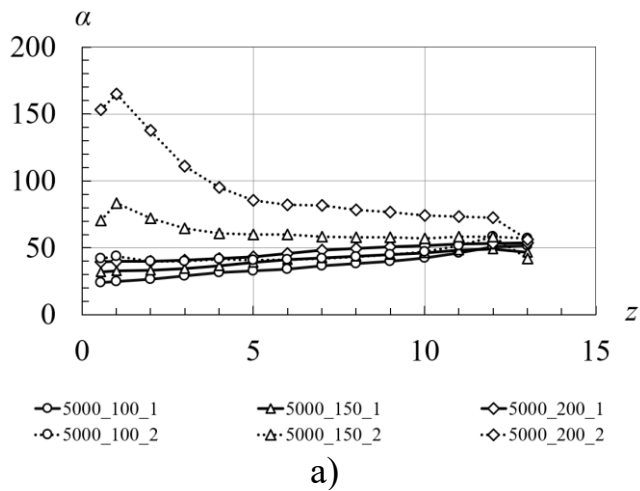
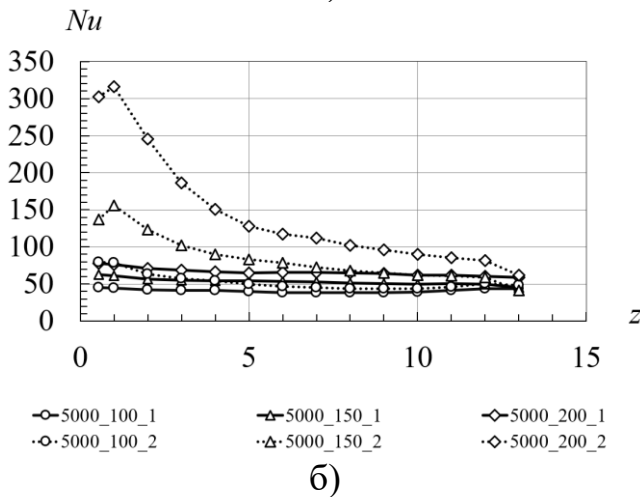


Рис. 19. Зміна температури та температурного напору по довжині каналу ($G = 100$ кг/год, $q_0 = 5000$ Вт/м²).



а)



б)

Рис. 20. Зміна локального коефіцієнту тепловіддачі (а) та числа Нуссельта (б) по довжині каналу.

Обробка результатів дослідження полягала в визначенні локальних, середніх за перерізом каналу коефіцієнтів тепловіддачі. При цьому, приймаючи до уваги, що середні температури поверхні каналу мають різні значення, коефіцієнти тепловіддачі визначалися окремо для гарячої поверхні та поверхні, що не обігривається. Нижче (Рис. 19) наводяться графіки зміни середніх температур (основна вісь) гарячої поверхні (100-1), поверхні, що не обігривається (100-2), та повітря (100-3) по довжині каналу. По допоміжній вісі – температурних напорів до гарячої поверхні (100-4) та поверхні, що не обігривається (100-5). Обчислено локальні коефіцієнти тепловіддачі та числа Нуссельта по довжині каналу (Рис. 20). Наведені результати демонструють, що характер зміни коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях каналу різний. Якщо для гарячої поверхні він якісно наближається до процесу примусової конвекції, то для протилежної поверхні така аналогія не спостерігається. Коефіцієнти тепловіддачі на поверхні, що не обігривається, більші, ніж на гарячій поверхні. По мірі нагрівання повітря різниця між коефіцієнтами тепловіддачі на протилежних поверхнях каналу знижується. Оцінка впливу гравітаційних та інерційних сил на інтенсивність теплообміну в каналі, починалася з визначення величини критеріїв Грасгофа та Рейнольдса по довжині каналу (Рис. 21). Найбільший вплив гравітаційних сил на інтенсивність теплообміну спостерігається в першій третині каналу ($10 \leq \frac{z}{X} < 100$). Біля гарячої поверхні вплив гравітаційних сил в 1,5 – 4,0 рази вищий, ніж біля поверхні, що не обігривається. Число

Рейнольдса слабо залежить від величини густини теплового потоку на гарячій поверхні. Відмінність в локальних значеннях збільшується по довжині каналу, та становить 0,92 – 1,0 одиниці.

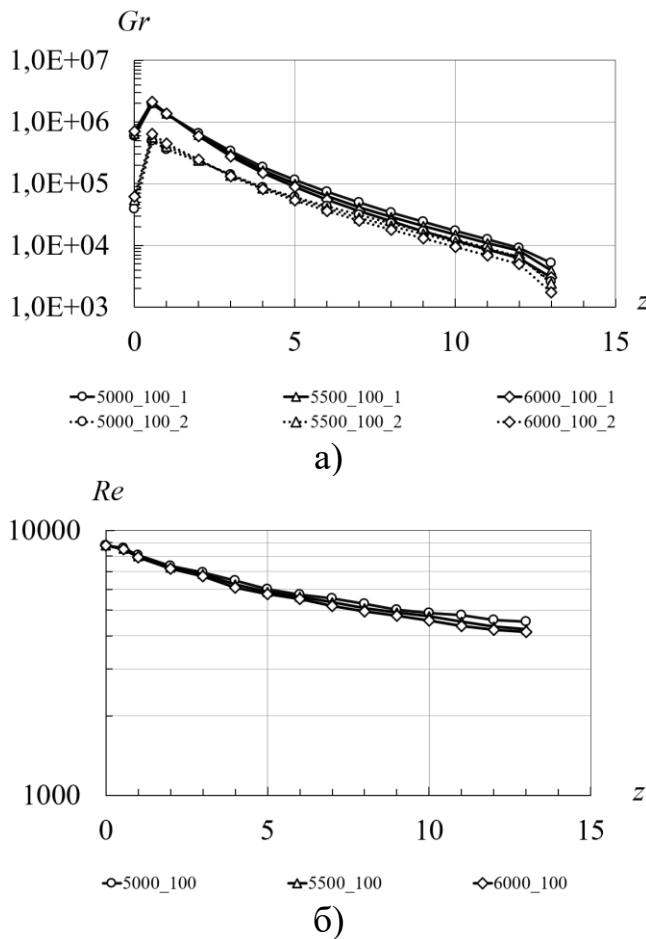


Рис. 21. Зміна числа Грасгофа (а) та Рейнольдса (б) по довжині каналу.

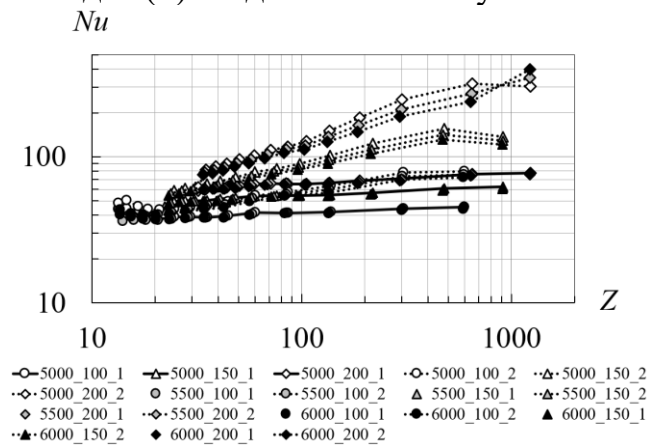


Рис. 22. Залежність локального числа Нуссельта від величини безрозмірної координати.

число Нуссельта при симетричному двобічному обігріві, крива 1, формула (33). Достовірність апроксимації ($R^2 \geq 0,98$). Зміна безрозмірного середнього інтегрального температурного напору по довжині безрозмірної координати, для гарячої поверхні (крива 2), та поверхні, що не обігрівається (крива 3), наводиться нижче (Рис. 23, б). Для порівняння, на тому ж графіку наводиться залежність середнього інтегрального температурного напору для випадку симетричного обігріву (крива 1)

На зведеному графіку можна бачити (Рис. 22), що локальні числа Нуссельта на гарячій поверхні для різних значень величини (q_0) практично співпадають. З достатньою для технічних розрахунків точністю можна стверджувати, що в діапазоні значень $q_0 \in [5000; 6000]$ W/m^2 , інтенсивності конвективного теплообміну однакові. Для поверхні, що не обігрівається, локальні числа Нуссельта залежать, як від масової витрати повітря в каналі, так і від величини густини теплового потоку на гарячій поверхні. При цьому залежність від густини теплового потоку більш суттєва, ніж спостерігалася для гарячої поверхні. У міру збільшення величини (q_0), криві локального числа Нуссельта на поверхні, що не обігрівається, наближаються до аналогічних кривих на гарячій поверхні. Із збільшенням координати (z) зменшується відмінність в значеннях локальних чисел Нуссельта для різних густин теплового потоку та різних масових витрат повітря в каналі (Рис. 20, Рис. 22). Узагальнення результатів експериментального дослідження проводилося з використанням залежності (33). Середні числа Нуссельта (\overline{Nu}_1) та (\overline{Nu}_2) обчислювалися через відому залежність для середнього числа Нуссельта (\overline{Nu}) (Рис. 24).

$$\left(\frac{\overline{Nu}_1}{\overline{Nu}}\right) = \frac{5}{3,9} \cdot \left(\overline{Re} \cdot \overline{Pr} \cdot \frac{x}{L}\right)^{\frac{1}{8}}, \quad (35)$$

$$\left(\frac{\overline{Nu}_2}{\overline{Nu}}\right) = 0,99 \cdot e^{\left[4,26 \cdot 10^{-4} \cdot (\overline{Re} \cdot \overline{Pr} \cdot \frac{x}{L})^{1,95}\right]}, \quad (36)$$

де \overline{Nu}_1 – середнє число Нуссельта на гарячій поверхні, крива 2 (Рис. 23, а); \overline{Nu}_2 – середнє число Нуссельта на поверхні, що не обігрівається, крива 3; \overline{Nu} – середнє

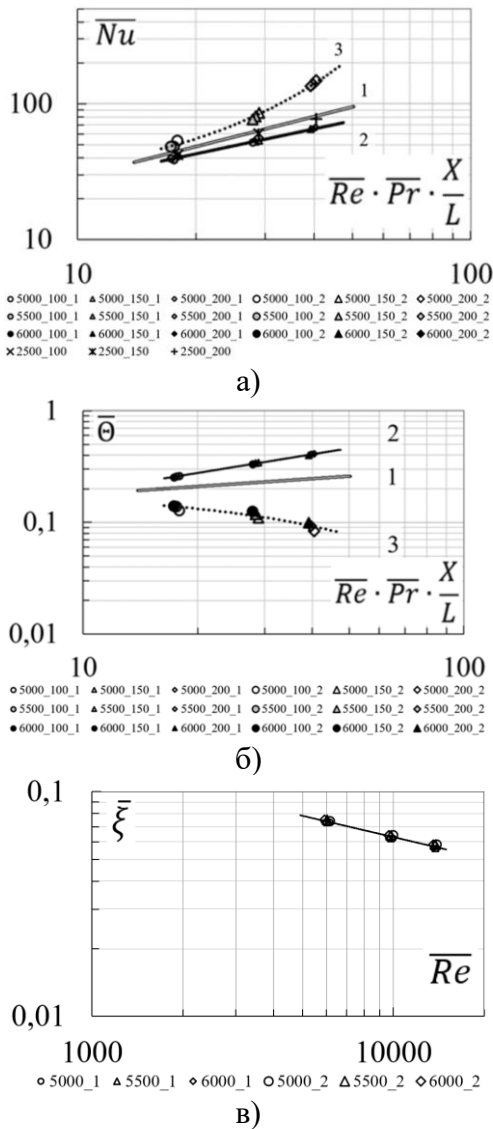


Рис. 23. Залежність середнього числа Нуссельта (а), безрозмірного середнього інтегрального температурного напору (б) та середнього коефіцієнту опору тертя (в) від безрозмірної координати: (1) симетричний обігрів; (2) однобічний обігрів, гаряча поверхня; (3) однобічний обігрів, поверхня, що не обігривається.

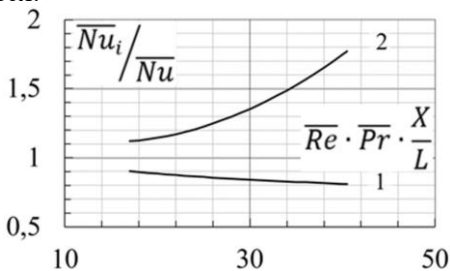


Рис. 24. Залежність відносного числа Нуссельта від безрозмірної координати: (1) гаряча поверхня; (2) поверхня, що не обігривається.

$$\Theta_1 = \frac{1}{19} \cdot \left(\overline{Re} \cdot \overline{Pr} \cdot \frac{X}{L} \right)^{\frac{1}{1,8}}, \quad (37)$$

достовірність апроксимації ($R^2 > 0,99$);

$$\Theta_2 = \frac{1}{5,28} \cdot e^{\left[-\frac{1}{55,87} \cdot \left(\overline{Re} \cdot \overline{Pr} \cdot \frac{X}{L} \right) \right]}, \quad (38)$$

достовірність апроксимації ($R^2 = 0,90$).

Середній коефіцієнт опору тертя, як функція від величини безрозмірної координати (Рис. 23, в), апроксимовано степеневою залежністю, достовірність апроксимації ($R^2 > 0,99$)

$$\overline{\xi} = \left(\frac{3,633}{\overline{Re}^{3,14}} \right)^{0,1}. \quad (39)$$

В четвертому розділі наводяться результати дослідження нестационарного теплообміну в високотемпературному компактному керамічному регенеративному теплообмінному апараті (ТА). Реалізація принципу високотемпературного спалювання окислювача (НіТАС) в плавильних печах, з використанням компактних ТА регенеративного типу з комірчастою структурою і пальниками регенеративного типу, дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічного процесу. Мета дослідження полягала у побудові теплових і енергетичних показників регенератора та визначенні періоду його роботи, при якому забезпечується тривала експлуатація. В роботі використовувалися аналітичні, чисельні та експериментальні методи дослідження.

Ефективність теплообмінника ε розраховувалася за залежністю –

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{G_g \cdot (c_p)_g [t_{gi} - t_{go}]}{G_a \cdot (c_p)_a [t_{gi} - t_{ai}]}, \quad (40)$$

де q, q_{max} – кількість теплоти в одиницю часу фактично передане і максимально можливе (Вт), відповідно. В якості аргументу використовуємо середню температуру газового потоку на виході з ТА t_{go} . При максимальній ефективності теплообмінника для температури t_{go} існує термодинамічна межа нижче якої температура продуктів згоряння знизитися не може, в припущенні, що вся теплота йде на нагрів окислювача (Рис. 25). Стосовно до розглянутих випадків мінімальна

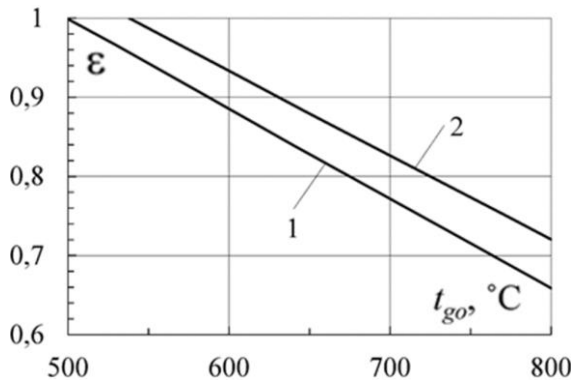


Рис. 25. Залежність ефективності теплообмінника від температури продуктів згоряння на виході з регенератора: $\alpha = 1,2$; $\Delta\alpha = 0,25$; 1 - $t_{gi}=1400$ °C; 2 - $t_{gi}=1500$ °C.

температура продуктів згоряння t_{go} , відповідна максимальній ефективності теплообмінника, дорівнює 499 °C (1) і 530 °C (2).

Число одиниць переносу NTU . У каналах насадка регенератора переважає вимушена течія, обумовлена зовнішнім градієнтом тисків, вплив вільного руху не враховується. Число одиниць перенесення визначалося виразом –

$$NTU = \frac{k_{cp} \cdot F}{G_a \cdot (c_p)_a}, \quad (41)$$

де k_{cp} – середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²°C). Локальні та середні коефіцієнти тепловіддачі в каналах насадка регенератора визначалися з рівняння, яке описує конвективний теплообмін при вимушеному русі в круглій трубі при постійних фізичних властивостях теплоносія, усталеній течії, початковій термічній ділянці і граничних умовах 2-го роду – $Nu_x = 1,31 \left(\frac{1}{Re Pr} \cdot \frac{x}{X} \right)^{-\frac{1}{3}}$, де в якості характерного лінійного розміру (X) використовувався гідравлічний діаметр каналу регенератора ($X=c$). На ділянці усталеної течії, після змикання температурних межових шарів, рівняння, що описує конвективний теплообмін при вимушеному русі і граничних умовах 2-го роду, набувало вигляду – $Nu = \frac{48}{11} = 4,36$. Середнє значення числа Нуссельта по довжині каналу визначалося шляхом інтегрування виразу для локального значення числа Нуссельта – $Nu_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx$. В якості розрахункової моделі для визначення часу зарядки/розрядки регенератора розглядався випадок нагрівання необмеженої пластини. Товщина необмеженої пластини приймалась рівною 2δ , початковий розподіл температури в пластині – рівномірним – $T(x, 0) = T_0$. У початковий момент часу пластини починає обдуватися газовим потоком з постійною температурою $T_g > T_0$. Теплообмін між обмежуючими поверхнями пластини і навколишнім середовищем описувався законом Ньютона. Диференціальне рівняння в частинних похідних, яке описує розрахункову модель, має вигляд $\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$. Початкова умова формулювалася, як $\tau = \tau_0 = 0$; $x \in [-\delta, +\delta]$; $T(x, \tau) = T(x, 0) = T_0$.

Граничні умови мають вигляд: $\tau > 0$; $x = 0$; $\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$; $\tau > 0$; $x = +\delta$; $\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=+\delta} = \alpha [T_g - T(\delta, \tau)]$. Диференціальне рівняння в частинних похідних, приведене до безрозмірного вигляду $\frac{\partial \theta(X, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta(X, Fo)}{\partial X^2}$, де $\theta = \frac{T_w - T}{T_w - T_0}$ – безрозмірна температура, T_w , T_0 температура поверхні та центра насадка, відповідно; $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – безрозмірний час (число Фур'є); $X = \frac{x}{\delta}$ – безрозмірна координата. Початкові і граничні умови після перетворень мали вигляд: 1) $Fo = 0$; $X \in [-1, +1]$; $\theta = 1$;

$$2) Fo > 0; \quad X = 0; \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=0} = 0;$$

$$3) Fo > 0; \quad X = +1; \quad \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=1} = -Bi \cdot \theta_{X=1}.$$

Розв'язання задачі виконувалося методом Фур'є. Рішення диференціального рівняння в частинних похідних, що описує розрахункову модель – $\theta(X, Fo) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(\lambda_n)}{\lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \cos(\lambda_n X) \exp[-\lambda_n^2 Fo]$.

При малих значеннях Bi ($Bi < 0,1$) швидкість нагрівання пластини визначається швидкістю перенесення тепла з навколишнього середовища до поверхні пластини. Вже при $Fo \geq 0,3$ ряд стає таким, що сходиться настільки швидко, що розподіл температури задовільно описується першим членом ряду –

$$\theta(X, Fo) = \frac{2 \sin(\lambda_1)}{\lambda_1 + \sin(\lambda_1) \cos(\lambda_1)} \cos(\lambda_1 X) \exp[-\lambda_1^2 Fo].$$

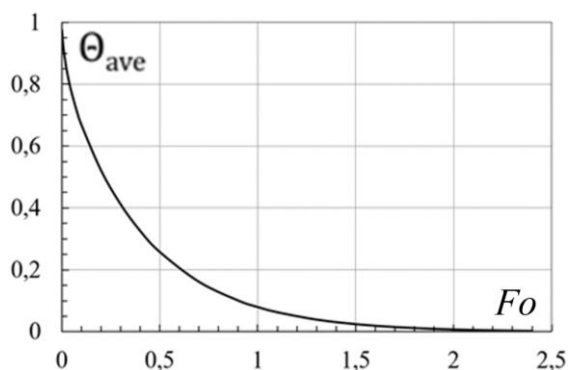


Рис. 27. Залежність середньої температури пластини від числа Фур'є.

Середня температура пластини визначалася виразами:

$$\Theta_{ave} = \int_0^1 \theta(X, Fo) dX = \frac{4 \sin^2(\lambda_1) \exp[-\lambda_1^2 Fo]}{\lambda_1 (\sin(2\lambda_1) + 2\lambda_1)},$$

$$\Theta_{ave} = \frac{T_w - T_{ave}}{T_w - T_0}.$$

Наводяться результати розрахунку профілів температури, як функції від лінійної координати і часу (Рис. 26). Можна бачити, що період прогріву стінки, коли необхідно враховувати характер розподілу температури, не перевищує $Fo \leq 2,5$ (Рис. 27). Вибираючи період зарядки / розрядки регенератора таким, щоб число Фур'є перевищувало величину $Fo = 2,5$, можна при проведенні аналізу не враховувати розподіл температури по перерізу стінки регенератора. Надалі, при обчисленні температури стінки регенератора малася на увазі середня температура T_{ave} . Зміна середньої температури стінки регенератора визначалася зі спільного розгляду рівнянь теплового балансу і теплопередачі $Q(\tau) = m \cdot c_{reg}(t) \cdot (T_{ave} - T_0)$; $Q(\tau) = \alpha \cdot F \cdot (t_{gi} - T_0)$. По черзі розглядалися періоди зарядки τ_{charge} і розрядки $\tau_{discharge}$ регенератора. Значення температури T_{ave} , одержане в кінці розрахунку одного періоду, приймалося в якості початкового значення для розрахунку другого періоду. Обчислення проводилися до моменту стабілізації температурних кривих, що характеризують періоди зарядки і розрядки регенератора. Результати розрахунку, одержані для різних умов роботи насадка ТА наводяться нижче ($t_{gi} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{ao} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$) (Рис. 28). Різниця температур насадка на початку і кінці періоду роботи ТА зростає зі збільшенням періоду роботи – $\Delta T_{ave} = (T_{ave}^{max} - T_{ave}^{min})_{\tau}$. Нижче (Рис. 29) наводиться безрозмірна величина $\varepsilon_{\Delta T_{ave}}$.

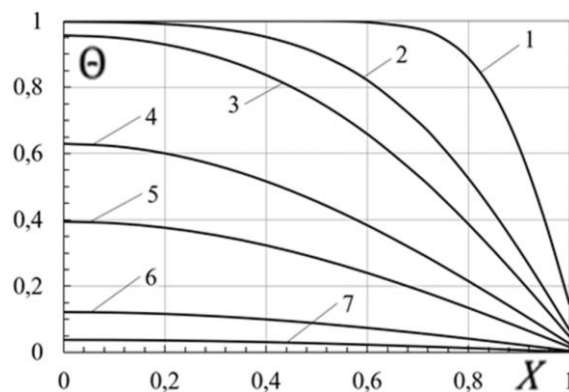


Рис. 26. Безрозмірні профілі температури в період зарядки/розрядки регенератора: $Bi < 0,05$; 1 – $Fo = 0,01$; 2 – $Fo = 0,05$; 3 – $Fo = 0,1$; 4 – $Fo = 0,3$; 5 – $Fo = 0,5$; 6 – $Fo = 1,0$; 7 – $Fo = 1,5$.

Зменшення середньої температури насадка регенератора зі збільшенням періоду його роботи призводить до зниження ефективності його роботи –

$$\varepsilon_{\Delta T_{ave}} = \frac{\Delta T_{ave}}{(t_{gi} - t_{ao})}$$

Стосовно до розглянутих умов, допустимий діапазон зарядки / розрядки насадки регенеративного ТА становить [5;20] с. Чим менший період зарядки / розрядки, тим більша ефективність ТА. Технічні показники ТА регенеративного типу одержано стосовно до умов проведення промислового експерименту (Таблиця 4), підтверджено їх високу ефективність.

Таблиця 4.

Теплотехнічні властивості ТА регенеративного типу з комірчастою структурою

№ ПП	Найменування позиції	Позначення	Од. вим.	Варіанти		
				1	2	3
1.	Температура продуктів згоряння початкова	t_{gi}	°C	1500	1525	1550
2.	Температура продуктів згоряння після ТА	t_{go}	°C	532	541	549
3.	Температура повітря початкова	t_{ai}	°C	40		
4.	Температура повітря після ТА	t_{ao}	°C	1423	1447	1470
5.	Потужність ТА	Q	кВт	18,7	19,0	19,4
6.	Ефективність ТА	ε		0,95	0,95	0,95
7.	Коефіцієнт рекуперації	ERR		0,56	0,56	0,56

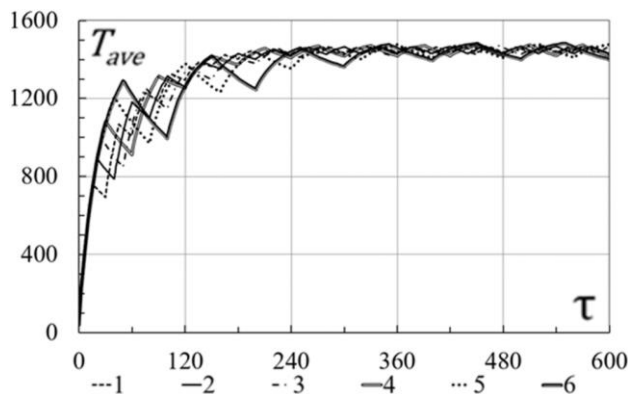


Рис. 28. Динаміка температури насадка регенератора у вхідному перерізі: 1 – $\tau = 15$ с; 2 – 20 с; 3 – 25 с; 4 – 30 с; 5 – 40 с; 6 – 50 с.

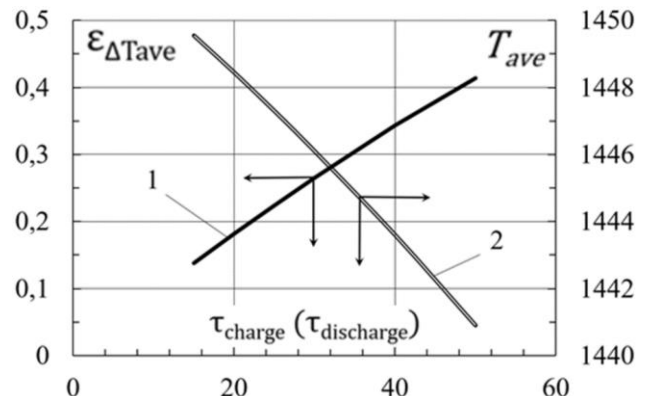


Рис. 29. Вплив періоду роботи τ (с) на характеристики ТА: $t_{gi} = 1500$ °C; $t_{ao} = 1300$ °C; 1 – $\varepsilon_{\Delta T_{ave}}$; 2 – T_{ave} .

П'ятий розділ містить дослідження тепломасообміну при зневодненні плит на основі базальтових волокон та бентонітового зв'язуючого. Вивчалися вплив на інтенсивність тепломасообміну температури, швидкості та вологовмісту агенту сушіння (АС), та аеродинаміка потоку АС в камері сушіння. Одержано узагальнену залежність для швидкості в першому періоді сушіння, як функції від зазначених факторів, та узагальнену залежність для розрахунку часу конвективного сушіння теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. Оцінено величину загальних втрат тиску в камері

конвективної сушарки. Тепломасообмін при конвективному зневодненні досліджувався експериментально, аеродинаміка потоку АС в камері досліджувалася чисельно. В рамках експериментального дослідження модернізовано дослідний стенд, розроблено методику проведення експериментів, оцінено похибки вимірювань. Обробка та узагальнення результатів експериментального дослідження тепломасообміну при зневодненні проводилася методом В.В. Краснікова. Результати чисельного дослідження аеродинаміки представлялися у критеріальному вигляді.

За характером будови базальтові плити з бентонітовим зв'язуючим можна віднести до капілярно-пористих колоїдних тіл. Схематично сушіння таких матеріалів представляється, як ряд зв'язаних один з одним процесів, а саме, переміщення вологи всередині матеріалу, пароутворення і видалення з поверхні розділу в оточуюче повітряне або газове середовище. Весь цикл сушіння може бути розділений на періоди, що відрізняються один від одного характером зміни вологи, швидкості сушіння і розподілом температури по перерізу висушуваних виробів.

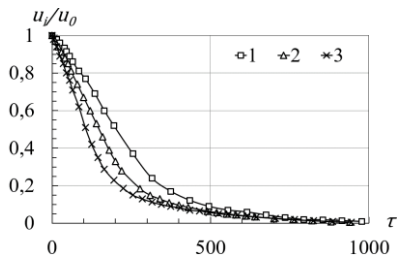


Рис. 30. Криві сушіння: $\delta = 100$ (мм), $t = 160$ (°C), $d = 20$ (г/кг с. п.), $v - \text{Varia}$, (1 - 3,1; 2 - 5,2; 3 - 7,7 (м/с)).

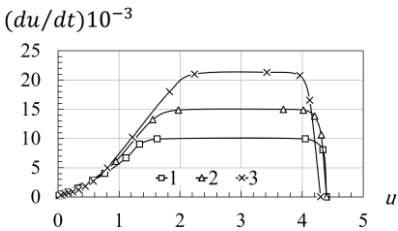


Рис. 31. Криві швидкості сушіння: $\delta = 100$ (мм), $t = 160$ (°C), $d = 20$ (г/кг с. п.), $v - \text{Varia}$ (1-3,1; 2-5,2; 3-7,7 (м/с)).

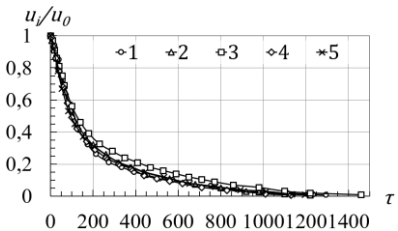


Рис. 32. Криві сушіння: $\delta = 100$ (мм), $t = 160$ (°C), $v = 7,7$ (м/с), $d - \text{Varia}$ (1-280; 2-270; 3-140; 4-65; 5-20 (г/кг с. п.)).

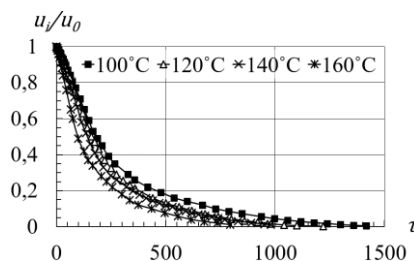


Рис. 33. Криві сушіння: $\delta = 50$ (мм), $v = 3$ (м/с), $d = 20$ (г/кг с. п.), $t - \text{Varia}$.

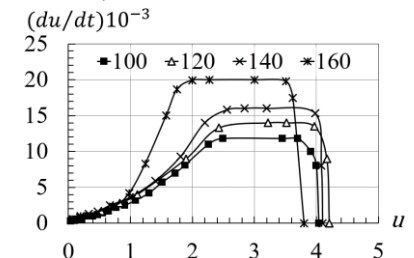


Рис. 34. Криві швидкості сушіння: $\delta = 50$ (мм), $v = 3$ (м/с), $d = 20$ (г/кг с. п.), $t - \text{Varia}$.

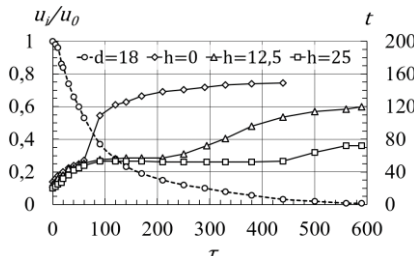


Рис. 35. Крива сушіння та динаміка температури зразка: $\delta = 50$ (мм), d (г/кг с. п.), h (мм).

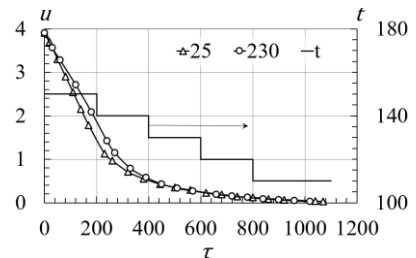


Рис. 36. Криві сушіння: $\delta = 100$ (мм), $v = 7,7$ (м/с), $t - \text{Varia}$ (°C), $d - \text{Varia}$ (г/кг с. п.).

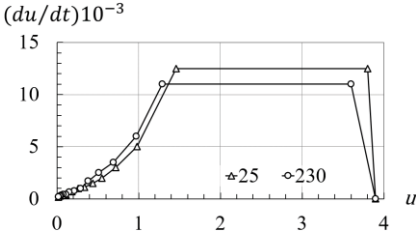


Рис. 37. Криві швидкості сушіння: $\delta = 100$ (мм), $v = 7,7$ (м/с), $t - \text{Varia}$ (°C), $d - \text{Varia}$ (г/кг с. п.).

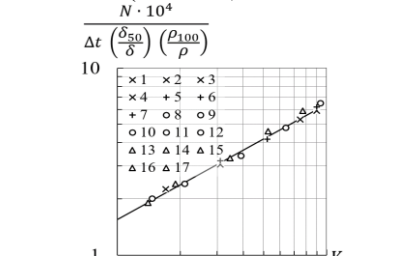


Рис. 38. Швидкість сушіння в 1-му періоді: 1-4, 8-12 $\delta = 42 - 52$ (мм); 5-7, 13-17 $\delta = 82 - 100$ (мм).

Встановлено, що: а) із збільшенням температури АС час сушіння зменшується (Рис. 33); б) збільшення швидкості АС інтенсифікує процес, ступінь впливу швидкості менша, ніж температури (Рис. 30); в) зміна вологовмісту АС суттєво не впливає на інтенсивність процесу, при побудові емпіричних кореляцій вплив цього фактору не враховувався (Рис. 32); г) порівняння кривих швидкості сушіння з динамікою прогріву зразків дозволило виявити наявність 1-го періоду сушіння та встановити величину першого критичного вологовмісту $u_{к1}$ (Рис. 31, Рис. 34, Рис. 35); д) в 1-му періоді сушіння спостерігається прямопропорційна залежність швидкості сушіння від різниці температур сухого та мокрого термометрів $\Delta t = t_c - t_m$ (°C). Змодельовані умови сушіння в реальній установці, коли спостерігається зниження температури АС, одержані дані з швидкості сушіння корелюють з результатами інших експериментів (Рис. 36, Рис. 37). Побудовано узагальнену кореляцію для швидкості сушіння в 1-му періоді (Рис. 38). З метою врахування впливу товщини та густини виробів, до неї включено коригуючі безрозмірні відношення $\left(\frac{\delta_{50}}{\delta}\right)$ та $\left(\frac{\rho_{100}}{\rho}\right)$. Кореляція апроксимована залежністю виду –

$$N = 1,55 \cdot 10^{-4} v^{0,6} (t_c - t_m) \left(\frac{\delta_{50}}{\delta}\right) \left(\frac{\rho_{100}}{\rho}\right), \quad (42)$$

де t_c – температура набігаючого потоку теплоносія (°C); t_m – температура мокрого термометра (°C); v – середня швидкість теплоносія в каналі над і під зразком плити (м/с); δ_{50} – умовна прийнята величина, по відношенню до якої приводяться фактичні товщини зразків плит, рівна 50 (мм); δ – фактична товщина плити (мм); ρ_{100} – мінімальна можлива об'ємна маса сухої плити, рівна 100 (кг/м³); ρ – фактична об'ємна маса сухої плити (кг/м³). Другий період сушіння представлено в напівлогарифмічній анаморфозі (Рис. 39, Рис. 40). Тангенси кутів нахилу прямих, що апроксимують дослідні дані, дорівнюють коефіцієнтам сушіння на різних етапах процесу $K_i = \chi_i \cdot N$.

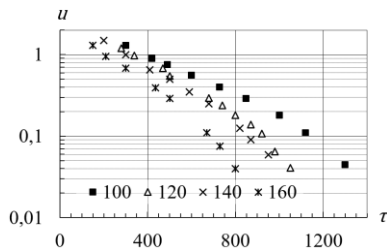


Рис. 39. Криві сушіння: $\delta = 42 - 52$ (мм), $v = 3,0$ (м/с), $d = 20$ (г/кг с. п.), $t - \text{Varia}$ (°C).

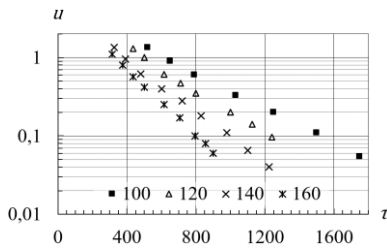


Рис. 40. Криві швидкості сушіння: $\delta = 82 - 100$ (мм), $v = 3,0$ (м/с), $d = 20$ (г/кг с. п.), $t - \text{Varia}$ (°C).

Узагальнена крива сушіння дозволила одержати приведені значення критичних вологовмістів, які характеризують якісні зміни у перебігу процесу (Рис. 41). На осі абсцис відкладався узагальнений час сушіння ($N\tau$), на осі ординат – відношення $\left(\frac{u_i - u_p}{u_0 - u_p}\right)$. Точки K_{150} , K_{100} відповідають першому критичному вологовмісту для базальто-бентонітових виробів товщиною 50 и 100 (мм), відповідно.

За аналогією з викладеним, точки K_{250} , K_{200} відповідають другому критичному вологовмісту. Нижче (Таблиця 5) наводяться значення відносних коефіцієнтів сушіння χ_1, χ_2 для базальто-бентонітових виробів товщиною 50 и 100 (мм). Узагальнена залежність для розрахунку часу сушіння теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів має вигляд –

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(u_0 - u_{к1}) + \frac{1}{\chi_1} \ln \frac{u_{к1} - u_p}{u_{к2} - u_p} + \frac{1}{\chi_2} \ln \frac{u_{к2} - u_p}{u_{к} - u_p} \right]. \quad (43)$$

Величини і коефіцієнти, що входять в узагальнену залежність часу сушіння

№ пп	Найменування позиції	Позначення	Товщина виробу	
			50	100
1	Приведений перший критичний вологовміст	$\frac{u_{к1} - u_p}{u_0 - u_p}$	0,41	0,20
2	Узагальнений час сушіння до приведенного першого критичного вологовмісту	$(N\tau)_1$	2,61	3,54
3	Приведений другий критичний вологовміст	$\frac{u_{к2} - u_p}{u_0 - u_p}$	0,04	0,02
4	Узагальнений час сушіння до приведенного другого критичного вологовмісту	$(N\tau)_2$	11,64	9,18
5	Відносний коефіцієнт сушіння	χ_1	0,266	0,456
6	Відносний коефіцієнт сушіння	χ_2	0,488	0,720

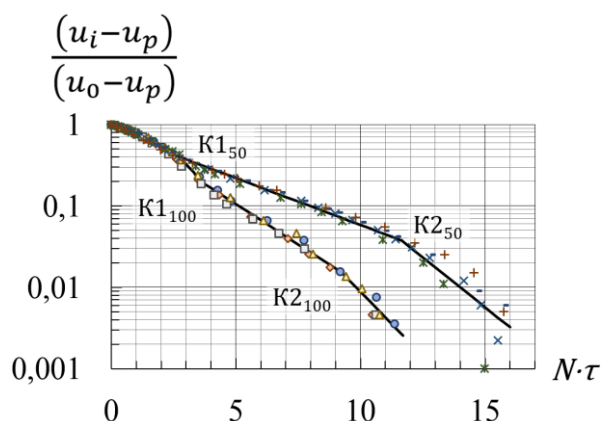
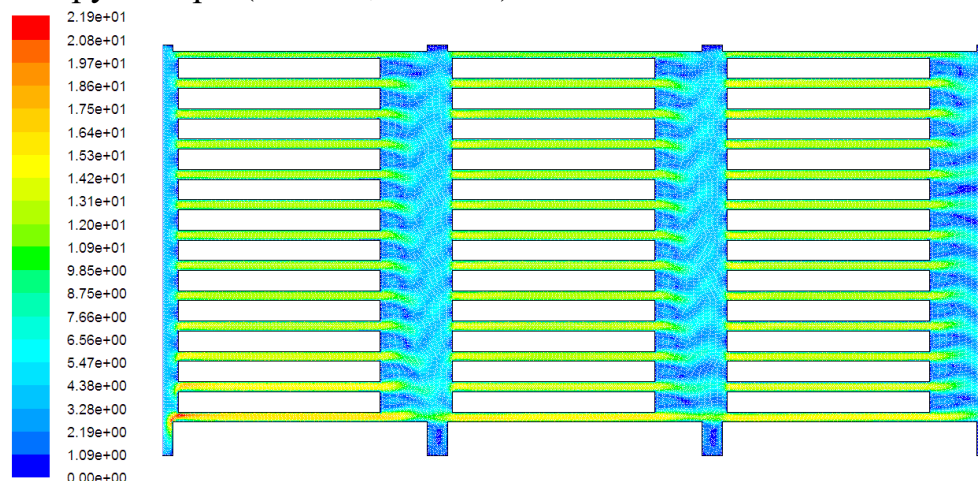


Рис. 41. Узагальнені криві сушіння базальто-бентонітових виробів товщиною 50 та 100 (мм).

Дослідження аеродинаміки потоку АС в камері сушіння виконувалося в 2D постановці з використанням CFD пакета. Моделювалася ізотермічна турбулентна течія ньютонівської рідини, що нестискається, течія стала, модель турбулентності – стандартна $k - \epsilon$ модель. Особливість постановки задачі – в якості АС виступала суміш продуктів згоряння природного газу з перегрітою водяною парою, розрахунковий діапазон зміни вологовмістів АС складав $[0,1; 0,5]$ (кг вол./кг сух. газу). Математична модель основана на сумісному розв'язку рівнянь нерозривності (26), переносу імпульсу (27), (28), кінетичної енергії (30) та швидкості дисипації (31). Для замикання системи рівнянь приймалася «зв'язка» Прандтля-Колмогорова. Розглянута компоновка камери сушіння, дозволяє мінімізувати величину некерованої циркуляції агенту сушіння по периметру камери (Рис. 42, Рис. 44).

Розглянута компоновка камери сушіння, дозволяє мінімізувати величину некерованої циркуляції агенту сушіння по периметру камери (Рис. 42, Рис. 44).

Рис. 42. Поле швидкостей АС в камері сушіння, плити $\delta = 100$ (мм).



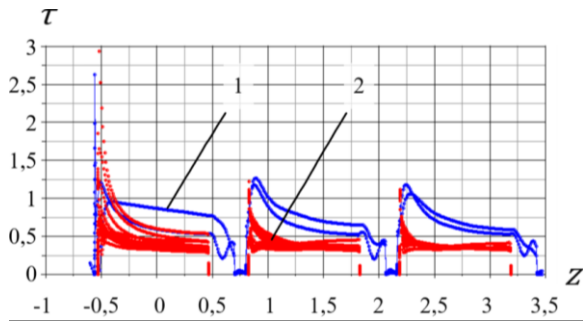


Рис. 43. Розподіл дотичних напружень по довжині розрахункової області z (м), τ (Па):

(1) огорожувальні конструкції; (2) поверхня матеріалу.

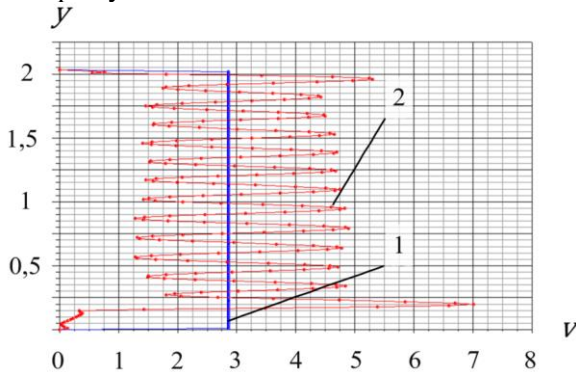


Рис. 44. Профілі швидкості в перерізах: (1) початковому; (2) вихідному u (м), v (м/с).

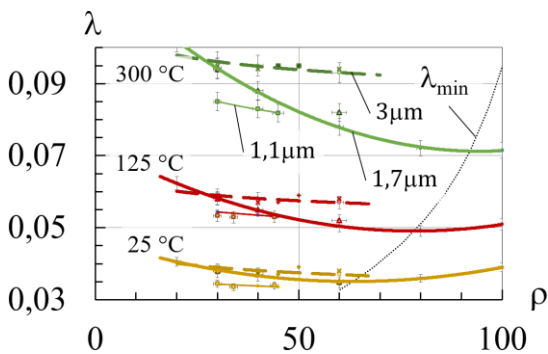


Рис. 45. Залежність коефіцієнту теплопровідності БСТВ від густини:

1) ρ (кг/м³); λ (Вт/(м²·°C)); 2) 25; 125; 300 °C – температури, при яких визначалися λ ; 3) 1,1; 1,7; 3 μm – середні діаметри елементарних БВ.

ного шару є мінімальною. Крива мінімальних значень коефіцієнтів теплопровідності БСТВ (1,7 μm) позначена символом λ_{min} . Дослідні ділянки теплоізоляційних конструкцій (ТК) встановлювалися на трубопроводі гострої пари (545 °C). Досліджувалися теплотехнічні та експлуатаційні властивості ТК. В якості основного шару теплової ізоляції застосовувалися БСТВ середнім діаметром 1,1 мкм, та густиною холста 30 та 40 кг/м³.

За рахунок постійного оновлення примежового шару на поверхні матеріалу досягається інтенсифікація зовнішніх процесів перенесення (Рис. 43). Одержано безрозмірну величину аеродинамічного опору камери сушіння $Eu = 5,65 \cdot Re^{1/16,8}$ (достовірність апроксимації $R^2 > 0,82$). Величини, які входять до критеріального рівняння, розраховані для умов потоку АС на вході в перший візок з матеріалом. Одержано проектні показники ефективності для тунельної сушарки – ККД 51-59%, питомі витрати на 1 кг випареної вологи становлять 1114-932 ккал/кг вол.

В шостому розділі подаються результати досліджень ефективності роботи теплової ізоляції на основі базальтових волокон (БВ) в складі теплоізоляційних конструкцій промислових та цивільних об'єктів. Наводиться опис дослідних об'єктів (Слов'янська ТЕС, Бурштинська ТЕС, ІТТФ), методики проведення та обробки результатів дослідження. Встановлено, що перехід до волокон з меншими діаметрами покращує властивості теплової ізоляції та здешевлює теплоізоляційну конструкцію. Волокнисті матеріали одержані з елементарних волокон з різними середніми діаметрами, відрізняються за своїми фізико-механічними властивостями. Перехід від волокнистих матеріалів з великим діаметром елементарних волокон до матеріалів з меншим діаметром, супроводжується підвищенням їх теплозахисних властивостей (Рис. 45). Дослідним шляхом встановлено, що волокнисті теплоізоляційні матеріали характеризуються оптимальною густиною, при якій теплопровідність теплоізоляцій-

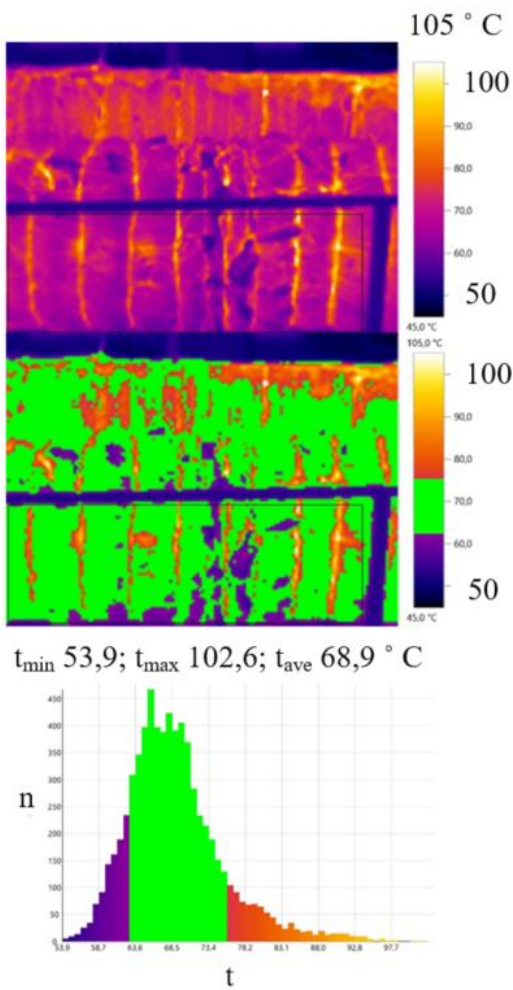


Рис. 46. Термограма ділянки ТК:
 $\varepsilon=0,93$; $t_{\text{ambient}}=47,4$ °C; $t_{\text{reflect}}=46$ °C.

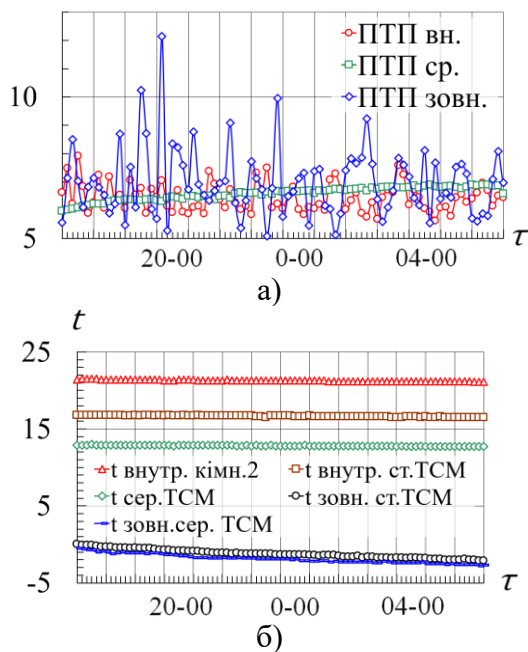


Рис. 47. Результати вимірювань густини теплового потоку (а) та температури (б): τ (год.); q (Вт/м²); t (°C).

В якості факторів, які визначають ефективність ТК, використовувалися температура та густина теплового потоку на поверхні. Нижче наводиться приклад тепловізійної зйомки ТК (Рис. 46). Дослідні ТК задовольнили вимогу максимальної температури поверхні – приведена температура поверхні зразка становила 48 °C, та вимогу економічної густини теплового потоку – приведена питома втрата теплоти через конструкцію перевищувала нормативне значення на 11% (менше 15%), стан ізоляції вважався задовільним і таким, що підлягає паспортизації.

В рамках програми з термомодернізації існуючого фонду житла, досліджено ефективність ТК, яка використовує в якості додаткового шару теплоізоляції плити на основі базальтових волокон та бентонітового зв'язуючого $\delta = 100$ (мм) (ІТТФ НАН України, корпус №1, вул. Булаховського, 2, м. Київ). Величина тепловтрат через дослідну ТК визначалася з застосуванням вимірювального комплексу реєстрацій температури та густини теплового потоку в характерних точках конструкції (Рис. 47). Встановлено значення коефіцієнтів теплопровідності додаткового шару теплоізоляції та його динаміку протягом підконтрольної експлуатації конструкції (Рис. 48). Підтверджено високі теплотехнічні та експлуатаційні характеристики конструкції. Дослідження планується проводити декілька років для того, щоб перевірити, як змінюються теплозахисні властивості ТК в умовах тривалої експлуатації.

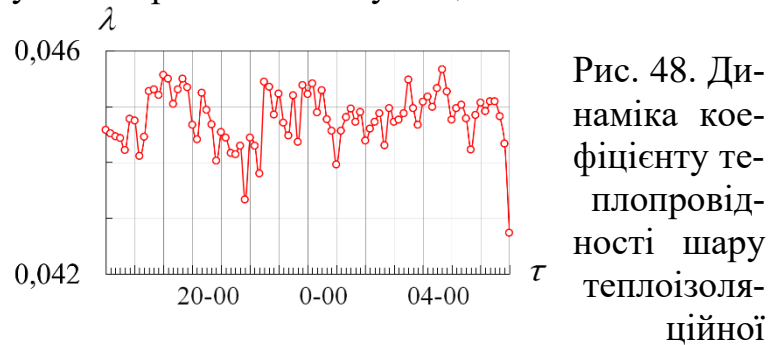


Рис. 48. Динаміка коефіцієнту теплопровідності шару теплоізоляційної плити на основі базальтових волокон та бентонітового зв'язуючого: τ (год.); λ (Вт/(м·°C)).

В сьомому розділі наводяться опис та результати натурних випробувань зразків дослідно-промислових установок, створених з метою енергоефективної модернізації галузі. Перелічуються технічні та організаційні рішення, що зумовлюють їх ефективність. З використанням результатів досліджень, наведених в розділі 3, розроблено герметичний корпус-теплообмінник (КТ) та створено на його основі систему керованого повітряного охолодження футеровки ванної плавильної печі. Проведено натурні випробування та визначено теплотехнічні характеристики КТ (Рис. 49, Таблиця 6). Розробка експлуатується в складі установок виробництва БСТВ та ББВ.

Таблиця 6.

Характеристики корпуса-теплообмінника

№ пп	Назва позиції	Од. вим.	Величина
1.	Теплова потужність	кВт	12-20
2.	Площа теплообміну	м ²	8,3
3.	Температура середовища:		
	вхід / вихід	°С	50/450
4.	Температура стінки	°С	до 700
5.	Тиск в системі	кПа	до 35
6.	Витрата середовища	кг/год	до 200
7.	Аеродинамічний опір	кПа	3,5



Рис. 49. Дослідно-промисловий зразок КТ: маса апарата 750 (кг); габаритні розміри (Д/Ш/В) 1320/960/920 (мм).

промислові зразки модульних агрегатів з виробництва БСТВ (за дуплекс-технологією) та ББВ (Рис. 51, Рис. 50).



Рис. 51. Дослідно-промисловий зразок агрегату БСТВ: продукція штапельне БВ 0,8-1,2(μm); продуктивність 700 (кг/добу).



Рис. 50. Дослідно-промисловий зразок агрегату ББВ: продукція безперервне БВ 8-13(μm)/15-20(μm); продуктивність 160 (кг/добу).

Агрегати містять у своєму складі нові базальтоплавильні печі з підігрівом повітря в компактних керамічних ТА регенеративного типу, систему керованого повітря-

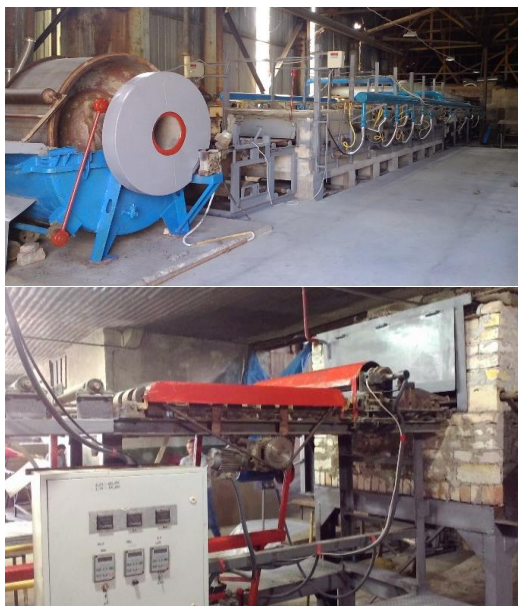


Рис. 52. Модернізована конвеєрна установка: продукція картон теплоізоляційний 5-19 (мм); продуктивність 23 м³/добу.

конвеєрної установки для сушіння плоских напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі БСТВ і бентонітового зв'язуючого (Рис. 52). Проведені роботи дозволили на 25-35% збільшити продуктивність установки по готовій продукції та на 15% знизити величину питомих енергетичних витрат на одиницю випареної вологи. Зниження долі енергоносіїв в собівартості високоякісної вітчизняної базальтової теплової ізоляції створює основу для її широкого застосування в системі житлово-комунального господарства. Проте, *необхідні організаційно-економічні системні заходи з боку держави, які б стимулювали, як виробництво такої продукції, так і її застосування у будівництві.*

ВИСНОВКИ

В роботі вирішується перспективна та актуальна науково-технічна проблема підвищення енергетичної ефективності виробництва базальтових волокон та теплової ізоляції на їх основі шляхом системної інтенсифікації багатостадійних теплотехнологій та її широке використання в промисловому та цивільному будівництві при умові кардинального зниження її вартості.

1. Вперше з застосуванням метода симетрій проведено автотельний аналіз гідродинаміки та теплообміну в примежовому шарі рідини на пластині з урахуванням залежності в'язкості від температури та дисипативних ефектів. Визначено автотельні змінні та функції. Одержано систему звичайних диференціальних рівнянь в автотельній формі. Одержана система чисельно розв'язувалась для умов течії та теплообміну розплаву базальту. Встановлено, що дисипативним доданком в автотельному рівнянні руху для умов, що розглядалися, можна знехтувати. Результати використано при 3D моделюванні процесу течії та теплообміну розплаву базальту у фідері модульної плавильної печі.

ного охолодження футеровки печі, модернізовані фільтрні живильники, систему дозування та завантаження сировини, систему безпеки, керування та автоматизації теплових процесів з функціями підтримання потужності та складу газоповітряної суміші. Реалізовані рішення дозволили в 2-4 рази скоротити споживання природного газу на етапі варіння базальтового скла – КВП збільшився в 2,4 рази та склав 0,79 одиниці, а ККД - на порядок, та склав 12,5%. Це дозволило в 1,5 рази скоротити його споживання при виробництві БСТВ. Крім того, при виробництві ББВ у 1,2-1,4 рази збільшено середню міцність базальтового директ-ровінгу по відношенню до волокон, одержаних на існуючих модульних установках. З використанням результатів досліджень, наведених в розділі 5, проведено модернізацію

2. Вперше побудовано розрахункову 3D модель гідродинаміки та теплообміну розплаву базальту при ламінарному безнапірному усталеному русі з урахуванням залежності теплофізичних властивостей від температури. Досліджено умови утворення гарнісажного шару в фідері модульної плавильної печі. Встановлено причини порушення процесів витікання та формування грубих волокон на пластинчастому фільтрному живильнику. Встановлено допустимі величини теплових потоків в фідері печі, які дозволяють виключити переохолодження розплаву та досягнення ним діапазону температур, які відповідають межах кристалізації. Сформульовано вихідні дані для модернізації фідеру плавильної печі та вузла кріплення пластинчастого фільтрного живильника.

3. Побудовано розрахункову модель аеродинаміки та теплообміну повітря при складному теплообміні та змішаному русі в корпусі-теплообміннику печі плавильної. Встановлено, що в розглянутому діапазоні величин густини теплового потоку та масової витрати повітря домінуючим теплообміном між стінками каналу та повітрям є складний конвективний теплообмін, при якому на примусову конвекцію впливає вільна конвекція. Одержано узагальнюючі залежності, які дозволяють обчислити середні числа Нуссельта, температурні напори та коефіцієнти опору тертя на поверхнях каналу. Результати використано при розробці системи керованого повітряного охолодження футеровки печі.

4. Встановлено, що реалізація принципу високотемпературного спалювання повітря (HiTAC) в теплотехнології з використанням компактних теплообмінників регенеративного типу з комірчастою структурою і пальниками регенеративного типу дозволяє підвищити енергетичну ефективність технологічного процесу. Стосовно до розглянутих умов дослідження допустимий діапазон зарядки / розрядки насадки регенератора становить [5; 20] с. Чим менший період зарядки / розрядки, тим більша його ефективність. Розглянута конструкція високотемпературного компактного керамічного теплообмінника регенеративного типу характеризується високими показниками ефективності ($\varepsilon = 0,95$), коефіцієнта рекуперації ($ERR = 0,56$) і чисел переносу ($NTU = 6,2$). Результати використано при розробці системи утилізації потенціалу продуктів згоряння.

5. Експериментально досліджено тепломасообмін при зневодненні жорстких (напівжорстких) плит на основі базальтових волокон та бентонітової глини. Одержано залежність для швидкості сушіння в першому періоді, як функції від температури і швидкості агенту сушіння. Одержано узагальнену залежність для розрахунку часу повітряного конвективного сушіння теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів різної товщини та густини. Побудовано розрахункову модель аеродинаміки сушильної камери та визначено показники її ефективності – ККД 51-59%, питомі витрати на 1 кг випареної вологи становлять 1114-932 ккал/кг. Результати використано при модернізації тунельної та конвеєрної сушильних установок виробництва жорстких та напівжорстких базальто-бентонітових виробів.

6. З застосуванням інноваційних компактних теплообмінних апаратів створено систему утилізації потенціалу високотемпературних продуктів згоряння природного газу, яка забезпечує підігрів повітря до 1300-1400 (°C). В поєднанні з герметичним

корпусом-теплообмінником та збільшенням продуктивності установки, перелічені заходи збільшують в 2,4 рази коефіцієнт використання палива в установці (0,79 одиниці) та на порядок її ККД (12,5%).

7. Зразки печей модульних ванних базальтоплавильних для виробництва штапельних супертонких волокон пройшли дослідно-промислові випробування та знаходяться в тривалій підконтрольній експлуатації у складі технологічних установок. Досягнуто питомі витрати природного газу на етапі плавлення та гомогенізації розплаву – 0,65 ст. м³/кг. Досягнуто питомі енергетичні показники в цілому по технологічному процесу 2,1-2,5 ст. м³ природного газу/кг готової продукції та 2,2-2,4 кВт·год/кг готової продукції. Досягнуто зниження питомої витрати природного газу: на плавлення в 3,0-4,0 рази; в цілому по дуплекс-технології до 2,0 разів. Економічний ефект від впровадження одного агрегату 1,848 млн. грн./рік.

8. Зразок печі модульної ванної базальтоплавильної для виробництва безперервних базальтових волокон пройшов дослідно-промислові випробування та знаходиться в тривалій підконтрольній експлуатації у складі технологічної установки. Досягнуто питомі витрати природного газу на етапі плавлення та гомогенізації розплаву – 0,8 ст. м³/кг. Досягнуто питомі енергетичні показники в цілому по технологічному процесу – 0,8 ст. м³/кг та 3,0 кВт·год./кг. В технології ББВ досягнуті результати дозволили знизити у 2 рази споживання природного газу на виробництво директ-ровінгу по відношенню до установок модульного типу. Крім того, середня міцність елементарного базальтового волокна одержаного на дослідно-промисловій установці, у 1,2-1,4 рази вища за аналогічний показник для елементарних волокон одержаних на існуючих модульних установках. Економічний ефект від провадження одного агрегату 0,133 млн. грн./рік.

9. Модернізовано конвеєрну установку для сушіння плоских напівжорстких теплоізоляційних виробів на основі базальтового супертонкого волокна. За рахунок збільшення кратності циркуляції теплоносія в сушильній камері підвищено зовнішні коефіцієнти тепломасообміну з поверхні. Інтенсифіковано процеси приготування теплоносія – суміші продуктів згоряння та атмосферного повітря, що дозволило зменшити зону масообміну та підвищити температурний рівень теплоносія. Інтенсифікація процесів приготування теплоносія та зовнішніх коефіцієнтів тепломасообміну дозволила на 27% зменшити внутрішній об'єм сушильної камери. Проведені роботи дозволили на 25-35% збільшити продуктивність установки по готовій продукції та на 15% знизити величину питомих енергетичних витрат на одиницю випареної вологи. Питомі енергетичні витрати на одиницю випареної вологи досягли 2000 ккал/кг. Економічний ефект від впровадження складає 0,554 млн. грн./рік.

10. Натурні дослідження ефективності теплоізоляції на основі базальтових волокон, проведені на різних об'єктах промислового та цивільного призначення, підтвердили її високу ефективність. Дослідні теплоізоляційні конструкції встановлені на трубопроводах гострої пари (545 °С) задовольнили вимогу максимальної температури поверхні – приведена температура поверхні зразка становила 48 °С, та вимогу економічної густини теплового потоку – приведена питома втрата теплоти через конструкцію перевищувала нормативне значення на 11% (менше 15%). Стан ізоляції вважався задовільним і таким, що підлягає паспортизації.

11. Зниження долі енергоносіїв в собівартості високоякісної вітчизняної базальтової теплової ізоляції створює основу для її широкого застосування в системі житлово-комунального господарства. Проте, необхідні організаційно-економічні системні заходи з боку держави, які б стимулювали, як виробництво такої продукції, так і її застосування у будівництві.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ІНДЕКСИ

$Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu_\infty}$ – місцеве число Рейнольдса; Nu_x – місцеве число Нуссельта; q_x – локальна густина теплового потоку; g – прискорення вільного падіння; G_{max} – максимальна масова витрата розплаву базальта; h_{max} – глибина, максимальна для перерізу, що розглядається; G_i – масова витрата розплаву базальта в i -му фільтрному каналі; G_{ave} – середня масова витрата розплаву базальта для групи фільтрних каналів; d_f – середній діаметр волокна в i -му фільтрному каналі; d_{ave} – середній діаметр вибірки базальтових волокон; q_{rad} – густина радіаційного теплового потоку з поверхні; G_g, G_a – масові витрати газу і повітря; t_{ai}, t_{ao} – початкова та кінцева температура повітря, відповідно; t_{gi}, t_{go} – температура продуктів згоряння початкова та кінцева, відповідно; $\Delta\alpha$ – додаткова кількість повітря, що потрапляє в піч при охолодженні технологічних елементів; t_{reg} – температура поверхні насадка регенератора; F – площа поверхні теплообміну; $\tau_{charge}, \tau_{discharge}$ – період зарядки, розрядки регенератора, відповідно; d – діаметр фільтрного каналу, вологовміст повітря або агенту сушіння; N – швидкість в першому періоді сушіння; u_0, u_p – початковий та рівноважний вологовміст матеріалу.

Список публікацій здобувача,

в яких представлені основні наукові результати дисертації:

1. Гулієнко С.В., Зубрій О.Г., & Тимощенко А.В. (2009). Дослідження опору щілинних теплообмінників. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація., №659: [40] с. 182-185. (Автор прийняв участь у формулюванні задачі, розробці методів та аналізі результатів дослідження).*
2. Малкін Е.С., Фуртат І.Е., Лунковський Д., & Тимощенко А.В. (2009). Математичне моделювання ізотермічної течії рідини в щілинному мікроканалі. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, (13), с. 39-44. (Автор прийняв участь у формулюванні задачі, розробці методів та аналізі результатів дослідження).*
3. Малкін Е.С., Ніколаєнко Ю.Є., Фуртат І.Е., Єфименко С.В., & Тимощенко А.В. (2009). Експериментальний стенд для дослідження теплообмінників на базі щілинних мікроканалів. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, (13), с. 45-49. (Автор прийняв участь у формулюванні задачі, розробці методів та аналізі результатів дослідження).*
4. Кремнев В.О., Шелиманова Е.В., Тимощенко А.В., & Билецкая Е.В. (2011). Особенности прогрева поверхности теплоизолирующих плит на основе базальтового волокна при их сушке. *Материалы 4-й международной научно-практической конференции Современные энергосберегающие тепловые технологии*

- (сушка и тепловлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011 (pp. 184-187). Москва, 20-23 сентября. **(РИНЦ)** (Автор прийняв участь в постановці та проведенні експериментальних досліджень, аналізі та узагальненні їх результатів).
5. Кремньов В.О., Михалевич В.В., Ляшенко А.В., & Тимощенко А.В. (2012). Фізичні характеристики біодобрив на основі курячого посліду. *Промислова теплотехніка*, 34(4), с. 34-38. (Автор прийняв участь в апробації методики визначення фізичних характеристик та методу зневоднення дисперсних матеріалів).
 6. Ніколаєнко Ю.Є., Фуртат І.Е., Дьячков М.І., & Тимощенко А.В. (2014). Методика розрахунку одно- та двоярусних мікрощілинних теплообмінників. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, (17), с. 71-76. (Автор прийняв участь в розробці та апробації методики розрахунку мікрощілинних теплообмінників рекуператорів).
 7. Басок Б.И., Давыденко Б.В., & Тимощенко А.В. (2015). Расчет количества потребляемой тепловой энергии при обогреве помещения чугунным радиатором М-140. Часть 1. Стационарный режим отопления. *Промышленная теплотехника*, 37(6), с. 75-81. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.6.2015.09>. (Автор прийняв участь в розробці та апробації методів розрахунку внутрішніх параметрів повітря в приміщенні, при стаціонарному режимі опалення).
 8. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Гончарук С.М., & Тимощенко А.В. (2016). Расчет количества потребляемой тепловой энергии при обогреве помещения чугунным радиатором М140. Часть 2. Периодический режим отопления. *Промышленная теплотехника*, 38(1), с. 68-74. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2016.10>. (Автор прийняв участь в розробці та апробації методів розрахунку внутрішніх параметрів повітря в приміщенні, при періодичному режимі опалення).
 9. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Гончарук С.М., & Тимощенко А.В. (2016). Температурно-вологісний стан стінової конструкції з шаром утеплювача в зимовий період року. *Промышленная теплотехника*, 38(6), с. 38-46. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.6.2016.06>. (Автор прийняв участь в апробації розрахунково-експериментального методу визначення температурно-вологісних характеристик огорожуючої стінової конструкції, термомодернізованої шаром базальто-бенітонітової теплоізоляційної плити).
 10. Basok B., Davydenko B., & Timoshchenko A. (2015). Heat transfer and hydrodynamics at gravitational convection movement in plane vertical channel of composite construction of thermal insulation. *Non-Conference Proceedings of Scientific Papers, Technical University of Kosice, Cassotherm*, p. 6-10. http://www.svf-tzb.6f.sk/images/pdf/CASSOTHERM_2015/zbornik_cassotherm.pdf. (Автор прийняв участь в апробації чисельного методу дослідження течії та теплообміну в пласкому вертикальному каналі комбінованої теплової ізоляції).
 11. Kremnev V., Basok B., Tymchyshyn S., & Timoshchenko A. (2018). Energy saving in construction by wide application of high-quality insulation based on basalt fibers. *Journal of Modern Physics*, 9(9), с. 1724-1734. DOI: <https://doi.org/10.4236/jmp.2018.99108>. (*Web of Science*) (Автор прийняв участь

- в постановці задачі дослідження, аналізі причин високої енергоємності технології виробництва теплоізоляції на основі базальтових волокон, сформулював шляхи вдосконалення виробництва).
12. Тимощенко А.В., Дмитренко Н.П., & Ковецька М.М. (2018). Аналіз течії та теплообміну в пограничному шарі рідини з суттєвою залежністю в'язкості від температури. *Промислова теплотехніка*, 40(4), с. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.02>. (Автор прийняв участь в формулюванні задачі дослідження, апробації методики розрахунку, одержанні та аналізі результатів дослідження).
 13. Басок Б.І., Тимощенко А.В., & Корбут Н.С. (2018). Исследование процесса конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала из горных пород магматического происхождения. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (2), с. 76-83. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2018.147361> (Автор прийняв участь в постановці задачі дослідження, розробці та апробації методики експериментального дослідження, проведенні, аналізі та узагальненні його результатів).
 14. Basok B., Davydenko D., Novikov V., Sorokoviy R., Moroz M., & Timoshchenko A. (2018). Influence of Solar Radiation on the Temperature Regime of Buildings Walls. *Non-Conference Proceedings of Scientific Papers, Technical University of Kosice, Cassootherm*, p. 70-76. http://www.svf-tzb.6f.sk/images/pdf/CASSO-THERM_2018/cd%20cassootherm%202018.pdf .(Автор прийняв участь в постановці задачі дослідження характеристик огороджуючої стінової конструкції термомодернізованої шаром базальто-бентонітової теплової ізоляції, формулюванні вихідних даних обчислювального експерименту, аналізі та узагальненні результатів дослідження).
 15. Кремньов В.О., Шпільберг Л.Ю., Тимощенко А.В., Гулієнко О.В., & Тимощенко Є.В. (2018). Енергетична ефективність виробництва теплової ізоляції на основі базальтових супертонких волокон. *Кераміка: наука і життя*, 41(4), с. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.26909/csl.4.2018.3>. (Автор прийняв участь у постановці задачі дослідження, формулюванні причин високої енергоємності виробництва теплової ізоляції на основі базальтових волокон, аналізі методів його енергоефективної модернізації).
 16. Тимощенко А.В., Беляєва Т.Г., Стецюк В.Г., Сороковий Р.Я., & Мороз М.В. (2018). Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (3), с. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.163782>. (Автор прийняв участь в постановці задачі дослідження конвективного сушіння базальто-бентонітової теплової ізоляції, розробці методики експериментального дослідження, аналізі та узагальненні результатів дослідження).
 17. Басок Б.І., Давыденко Б.В., Гончарук С.Н., & Тимощенко А.В. (2018). Температурный режим помещения обогреваемого двумя двухпанельными радиаторами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (4), с. 20-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2018.175617>. (Автор прийняв участь в розробці та апробації методів розрахунку внутрішніх параметрів повітря в приміщенні, при змінних режимах опалення).

18. Тимощенко А.В., Тимощенко Є.В., Гулієнко О.В., & Беляєва І.П. (2019). Радіаційно-конвективна конвеєрна сушка базальто-бентонітових картонів. *Кераміка: наука і життя*, 1 (42), с. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.26909/csl.1.2019.2>. (Автором апробований розрахунково-експериментальний метод дослідження, проведено аналіз на узагальнення результатів дослідження).
19. Басок Б.І., & Тимощенко А.В. (2019). Високотемпературний компактний керамічний регенеративний теплообмінний апарат. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2 (56), с. 17-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2019.189990>. (Автором розроблено та апробовано метод розрахунку періоду роботи високотемпературного компактного регенеративного теплообмінного апарата).
20. Basok B., Davydenko B., Lysenko O., Goncharuk S., & Timoshchenko A. (2019). Calculation of the amount of heat entering the room from a heating device operating in stationary and non-stationary regimes. *Materials of the 9th International Scientific-Practical Conference ENERGY INTEGRATION-2019* (pp. 28, 29). Kyiv, April 24-26. [електронне видання] (Автором апробовано методи розрахунку внутрішніх параметрів повітря в приміщенні, при змінних режимах опалення).
21. Kremnev V., Basok B., Davydenko B., Timoshchenko A., & Timoshchenko Al. (2019). Flow and Heat Transfer of Basalt Melt in the Feeder of the Smelter Furnace. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 7, 2555-2563 DOI: <https://doi.org/10.4236/jamp.2019.711174> (*Web of Science*) (Автором сформульовано задачі дослідження та апробовано методи розрахунку гідродинаміки та теплообміну розплаву базальту в фідері плавильної печі, сформульовано шляхи вдосконалення обладнання).
22. Basok B., Novitska M., Goncharuk S., Moroz M., & Timoshchenko A. (2019). Experimental Passive House of the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine. *Materials of the 6th International Conference on ENERGY SMART SYSTEMS (2019 IEEE ESS)*, April 17-19, 2019. - Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. – P. 108-111. <http://doi.org/10.1109 / ESS.2019.8764182> (*Scopus*) (Автор прийняв участь у формулюванні задачі дослідження та апробації розрахунково-експериментальної методики дослідження).
23. Басок Б.І., Давыденко Б.В., & Тимощенко А.В. (2019). Температурный режим моногранулирования при производстве имитированных пищевых продуктов. *Scientific Works*, 1 (83), с. 80-84. DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1422> (Автор прийняв участь у формулюванні задачі дослідження та апробації розрахунково-експериментальної методики дослідження).
24. Шеліманова О.В., Кремнев В.О., Корбут Н.С., & Тимощенко А.В. (2019). Організоване довготривале зберігання та попереднє сушіння неліквідної деревини (хворосту і хмизу) на відкритому повітрі під впливом природніх факторів. *Енергетика і автоматика*, 6, 111-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2019.06.111> (Автор прийняв участь у формулюванні задачі дослідження та апробації розрахунково-експериментальної методики дослідження).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

25. Малкін Е.С., & Тимощенко А.В. (2006). Гідродинаміка та теплообмін в концентричних кільцевих мікроканалах з різним ступенем обробки поверхонь, стосовно компактних тепломасообмінних апаратів. *Зб. наук. праць ювілейної міжнародної науково-технічної конференції „Сучасні екологічно безпечні тепломасообмінні процеси в технологіях легкої промисловості”* (с. 50-52). Київ, 17-19 травня.
26. Кремнев В.О., Шпильберг Л.Е. А.П. Гартвиг А.П., & Тимощенко А.В. (2009). Применение щелевых теплообменных аппаратов в системах утилизации высокотемпературных ВЭР. *Тезисы доклада VI Международной конференции „Проблемы промышленной теплотехники”* (31(7), с. 79). Киев, май.
27. Кремнев В.О., Шелиманова Е.В., Билецкая Е.В., & Тимощенко А.В. (2011). Механизм прогрева теплоизоляционных базальтовых плит при их сушке. *Тезисы доклада VII Международной конференции „Проблемы промышленной теплотехники”* (33(7), с. 68). Киев, 23-27 мая.
28. Кремнев В.О., Шпильберг Л.Е., Гартвиг А.П., & Тимощенко А.В. (2011). Системы утилизации высокотемпературных ВЭР. *Тезисы доклада VII Международной конференции „Проблемы промышленной теплотехники”* (33(7), с. 69). Киев, 23-27 мая.
29. Кремнев В.О., & Тимощенко А.В. (2013). Повышение энергетической эффективности производства базальтовых супертонких волокон и изделий. *Тр. Межд. конф. «Украина – Россия Сколково Единое инновационное пространство»*. Киев, 23-24 мая.
30. Кремнев В.О., Корбут Н.С., Шпильберг Л.Е., Гулиенко О.В., Стецюк В.Г., & Тимощенко А.В. (2013). Исследование процесса конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала из основных горных пород. *Тезисы VIII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники»*. Киев, 8–11 октября.
31. Кремнев В.О., Корбут Н.С., Шпильберг Л.Е., Гулиенко О.В., Стецюк В.Г., & Тимощенко А.В. (2013). Техническое совершенствование второго этапа дуплекс-технологии путем оптимизации работы струйного аппарата-смесителя. *Тезисы VIII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники»*. Киев, 8–11 октября.
32. Кремнев В.О., Басок Б.И., Тымчишин С.В., Медведев Т.А., & Тимощенко А.В. (2016). Научно-технические основы комплексной модернизация дуплекс-технологии производства базальтовых волокон. *I-й Международный базальтовый форум*. Москва, 17-18 ноября.
33. Кремнев В.О., Шпильберг Л.Ю., Гулиенко О.В., Корбут Н.С., Тымчишин С.В., & Тимощенко А.В. (2017). Створення і впровадження нової установки (другого покоління) виробництва базальтового супертонкого волокна (БСТВ). *Тези X Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», яка є правонаступницею конференцій «Проблеми промислової теплотехніки»*. Київ, 23 – 26 травня. *Промышленная теплотехника*. Київ. 2017. – Т. 39, № 7. С. 87-88.

34. Гулієнко О.В., Корбут Н.С., Тимчишин С.В., Кемаєв В.Ф., & Тимощенко А.В. (2017). Модернізація безперервної технологічної лінії виробництва базальтового картону. *Тези X Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», яка є правонаступницею конференцій «Проблеми промислової теплотехніки»*. Київ, 23 – 26 травня. Промышленная теплотехника. Київ. 2017. – Т. 39, № 7. С. 88-89.
35. Гулієнко О.В., Корбут Н.С., Кемаєв В.Ф., & Тимощенко А.В. (2017). Дослідження впливу конструкції та розташування газових пальників на характеристики теплоносія в сушильній зоні. *Тези X Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», яка є правонаступницею конференцій «Проблеми промислової теплотехніки»*. Київ, 23 – 26 травня. Промышленная теплотехника. Київ. 2017. – Т. 39, № 7. С. 93.
36. Basok B., & Timoshchenko A. (2018). Gas burner with a wide range of power adjustment and plate flow turbulators. *19th SHAOXING OVERSEAS TALENTS PROGRAM COMPETITION*. Shaoxing, China, December 14-16.
37. Кремньов В.О., Кемаєв В.Ф., Тимощенко Є.В., Гулієнко О.В., & Тимощенко А.В. (2019). Результати промислової підконтрольної експлуатації інноваційної модульної дослідно-промислової установки виробництва базальтового дірект-ровінга. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Київ, 21-22 травня. Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. С. 70.
38. Недбайло О.М., Ткаченко М.В., Божко І.К., & Тимощенко А.В. (2019). Аналіз теплотехнічних характеристик системи водяного підлогового опалення сухого монтажу. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Київ, 21-22 травня. Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. – С. 75.
39. Гулієнко О.В., Тимощенко Є.В., Стецюк В.Г., & Тимощенко А.В. (2019). Конвективна сушка теплоізоляційних базальто-бентонітових виробів – науко-во-технічна основа енергоефективної модернізації теплотехнології. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Київ, 21-22 травня. Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. С. 78.
40. Лебохорський В.Р., Тимощенко Є.В., Гулієнко О.В., & Тимощенко А.В. (2019). Дослідження впливу теплотехнологічних параметрів виробництва на якість базальтового дірект-ровінгу. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Київ, 21-22 травня. Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. С. 82.
41. Гулієнко О.В., Тимощенко Є.В., Корбут Н.С., & Тимощенко А.В. (2019). Дослідження радіаційно-конвективної конвекційної сушки базальто-бентонітових картонів, як першої черги інноваційної модернізації теплотехнології. *Тези XI Міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Київ, 21-22 травня. Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. С. 85.
42. Basok B., & Timoshchenko A. (2019). Household gas stove with an energy efficient fuel combustion system. *20th SHAOXING OVERSEAS TALENTS PROGRAM COMPETITION*. Shaoxing, China, June 14-16.

43. Basok B., & Timoshchenko A. (2019). Energy efficient fuel burning system of variable power. *The Third Session of Shanxi Talent Leader of Shengzhou Entrepreneurship B. Innovation Competition*. Shengzhou, China, June 22-24.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

Патенти:

1. Патент на корисну модель № 73182, Україна. Спосіб одержання композиційного формованого палива. Михалевич В.В., Ляшенко А.В., Кремньов В.О., Тимощенко А.В. // опубл. 10.09.2012.
2. Патент на корисну модель № 73183, Україна. Композиційне формоване паливо. Михалевич В.В., Ляшенко А.В., Кремньов В.О., Тимощенко А.В. // опубл. 10.09.2012.
3. Патент на корисну модель № 75510, Україна. Композиційне формоване паливо. Михалевич В.В., Ляшенко А.В., Кремньов В.О., Тимощенко А.В. // опубл. 10.12.2012.

Основні результати у публікаціях відображені повно.

АНОТАЦІЯ

Тимощенко А.В. Науково-технічні основи підвищення енергоефективності виробництва та використання теплоізоляційних матеріалів на основі базальтових волокон. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (144 – Теплоенергетика). – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2021.

В дисертаційній роботі представлено результати комплексного дослідження гідрогазодинамічних та тепломасообмінних процесів, що протікають в елементах технологічного обладнання для виробництва базальтових волокон та теплової ізоляції на їх основі. Крім того, наводяться результати досліджень теплотехнічної ефективності теплоізоляційних конструкцій на основі матеріалів з базальтовими волокнами. Представлено результати аналітичного та чисельного дослідження гідродинаміки та теплообміну при течії розплаву в ванній та фідерній частинах печі плавильної. Приведено поля температур, швидкостей та тисків в розрахунковій області. Сформульовано умови раціонального охолодження футеровки печі. Представлено результати дослідження аеродинаміки та теплообміну повітря при складному теплообміні та змішаному русі в корпусі печі. Для інженерних розрахунків наводяться узагальнені залежності для середніх чисел Нуссельта, температурних напорів та коефіцієнтів опору тертя на поверхнях печі. Приводяться результати дослідження нестационарного теплообміну в високотемпературному компактному керамічному регенеративному теплообміннику, обчислено періоди та показники ефективності його роботи. Представлено результати експериментального дослідження тепломасообміну при зневодненні теплоізоляційних плит на основі базальтових волокон та бентонітового зв'язуючого. Наводяться узагальнені залежності для розрахунку швидкості сушіння в 1-му періоді та загального часу сушіння для виробів різної товщини. Описано інноваційні технічні

рішення, що сприяють підвищенню енергетичної ефективності виробництва базальтових волокон з метою кардинального зниження споживання природного газу.

Ключові слова: базальтові волокна, піч плавильна, гідродинаміка, теплообмін, сушіння, теплоізоляція, енергоефективність.

SUMMARY

A. V. Timoshchenko **Scientific and technical bases of increase of energy efficiency of production and use of heat-insulating materials on the basis of basalt fibers.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscripts.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering (144 - Thermal power engineering). - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation presents the results of a comprehensive study of hydrogasdynamics and heat and mass transfer processes occurring in the elements of technological equipment for the production of basalt fibers and thermal insulation based on them. In addition, the results of studies of thermal efficiency of thermal insulation structures based on materials with basalt fibers are presented. The results of analytical and numerical study of hydrodynamics and heat transfer during the melt flow in the bath and feeder parts of the smelting furnace are presented. The fields of temperatures, velocities, and pressures in the calculation area are given. The conditions of rational cooling of the furnace lining are formulated. The results of the study of aerodynamics and heat exchange of air with complex heat exchange and mixed motion in the furnace body are presented. For engineering calculations, generalized dependences for Nusselt averages, temperature heads, and coefficients of friction resistance on furnace surfaces are given. The results of research of non-stationary heat exchange in a high-temperature compact ceramic regenerative heat exchanger are given, the periods and indicators of its efficiency are calculated. The results of an experimental study of heat and mass transfer in dehydration of thermal insulation boards based on basalt fibers and bentonite binder are presented. Generalized dependences for calculation of drying speed in the 1st period and total drying time for products of different thicknesses are given. Innovative technical solutions that increase the energy efficiency of basalt fiber production in order to dramatically reduce natural gas consumption are described.

Keywords: basalt fibers, melting furnace, hydrodynamics, heat exchange, drying, thermal insulation, energy efficiency.