

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

РАЧИНСЬКИЙ АРТУР ЮРІЙОВИЧ

УДК 536.423.4

**ГІДРОДИНАМІКА І ТЕПЛОМАСООБМІН В КОНТАКТНОМУ
УТИЛІЗАТОРІ ТЕПЛОТИ ГАЗОКРАПЕЛЬНОГО ТИПУ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі теоретичної і промислової теплотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Безродний Михайло Костянтинович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», професор кафедри теоретичної і
промислової теплотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теплоенергетики

доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації

Захист дисертації відбудеться 16 травня 2017 року о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.09 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано „___” квітня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема енергозбереження та ефективного використання енергоресурсів є найбільш актуальною на сучасному етапі розвитку енергетики України. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розроблення комплексу заходів з використання вторинних енергоресурсів і, зокрема, корисне використання теплоти відхідних газів технологічного та енергетичного обладнання.

Для утилізації теплової енергії відхідних газів котельних, газотурбінних установок, отримання нагрітої води широко застосовують контактні тепломасообмінні апарати, що дозволяє досягнути глибокого охолодження газів і, таким чином, збільшити коефіцієнт використання теплоти палива. Незважаючи на різноманітність конструкцій контактних апаратів, серед яких найбільш поширеними є плівкові апарати, більшість з них не позбавлені недоліків і потребують подальшої інтенсифікації процесів переносу. На цьому фоні значний інтерес представляють крапельні контактні апарати з використанням різних конструкцій розпилювачів, в тому числі відцентрових форсунок. Інтенсифікація робочих процесів у таких апаратах досягається за рахунок збільшення міжфазної поверхні теплообміну, що приводить до підвищення інтенсивності тепломасовіддачі на одиницю об'єму апарату.

У таких апаратах передача теплоти від відхідних парогазових продуктів згорання до рідини, яка нагрівається, відбувається на поверхні багаточисленних крапель при безпосередньому контакті теплоносіїв, що значно покращує умови передачі теплоти і маси, а також дозволяє зменшити викиди оксидів азоту (NO_x) при їх абсорбції водою. Проте у доступній літературі більшість робіт присвячені експериментальному дослідженню процесів тепломасовіддачі між одиночною краплею води та парогазовою сумішшю. Що стосується ансамбля крапель, то такі дослідження практично відсутні. В практичних розрахунках таких апаратів автори замінюють дійсну поверхню крапель розпиленої води на умовну, використовуючи при цьому площу поперечного перерізу контактного апарату, знижуючи цим цінність і універсальність отриманих результатів. З огляду на це актуальним є проведення дослідження процесів тепломасовіддачі в системі «парогазова суміш – ансамбль крапель розпиленої води» для контактних утилізаційних апаратів крапельного типу, які будуть віднесені до дійсної поверхні контакту фаз. Дані дослідження дозволять розробити нову методику розрахунку крапельного контактного апарату.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертацію виконано на кафедрі теоретичної і промислової теплотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Тематика дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку досліджень кафедри та виконувалась у відповідності з програмою досліджень Міністерства освіти і науки України по напрямку «Науково-технічні проблеми технічної теплофізики та промислової теплоенергетики» за темою: «Гідродинаміка і тепломасообмін в контактних газо-крапельних утилізаторах теплоти» (номер державної реєстрації 0115U000328), яка виконувалась за тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є вдосконалення методів розрахунку коефіцієнтів тепло-масовіддачі при динамічній взаємодії крапель розпиленої за допомогою механічної відцентрової форсунки рідини та парогазової суміші у крапельному контактному апараті, розроблення інженерної методики розрахунку таких контактних крапельних апаратів.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити характеристики факела розпилу (густину зрошення за перерізом факелу розпиленої рідини, кут розкриття факела і середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель рідини). Отримати узагальнюючі залежності для визначення характеристик факела розпилу при розпиленні рідини відцентровими механічними форсунками.

2. Розробити методику визначення реальної поверхні контакту фаз.

3. Провести експериментальні дослідження процесів тепло- і масовіддачі при конденсації пари з парогазової суміші на поверхні крапель розпиленої механічними відцентровими форсунками рідини. На основі аналізу експериментальних досліджень отримати узагальнюючі залежності для визначення коефіцієнтів тепло- і масовіддачі.

4. Розробити методику розрахунку крапельного контактного утилізатора теплоти при розпиленні рідини механічними відцентровими форсунками.

Об'єктом дослідження є механізм взаємодії крапель рідини та парогазової суміші в газокрапельній системі контактного утилізатора теплоти з відцентровим розпилювачем рідини.

Предметом дослідження є вплив режимних параметрів на характеристики факелу розпилу і тепломасообміну в умовах охолодження парогазового потоку з конденсацією пари.

Методи дослідження. Для вирішення сформульованих вище задач використовувались експериментальні методи дослідження характеристик факелу розпилу рідини відцентровими механічними форсунками та процесів переносу при конденсації водяних парів з парогазової суміші на поверхні крапель рідини.

Експериментальні дослідження характеристик факелу розпилу та коефіцієнтів переносу проводились на спеціально створених експериментальних установках. Дослідження характеристик факелу розпилу проводились на основі визначення кута розкриття факелу форсунки, густини зрошення по перерізу факелу розпиленої рідини та виміру розміру крапель рідини. Інтенсивність процесів переносу розраховувалась на основі попереднього визначення реальної поверхні контакту фаз та вимірних значень температур крапель рідини та «сухого» і «мокрого» термометра парогазової суміші по перерізу контактної камери в апараті, витрати теплоносіїв. Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням отриманих результатів з результатами відомих робіт. Оброблення та узагальнення отриманих результатів проводились із застосуванням методу найменших квадратів з використанням комп'ютера.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– Отримано залежності для визначення характеристик факела розпилу (густини зрошення за перерізом факела розпиленої рідини, кута розкриття факела форсунки,

середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель рідини) у раніше не досліджуваному діапазоні надлишкових тисків води перед форсункою від 0,2 до 0,6 МПа.

- Встановлено характер впливу вхідних параметрів води (надлишкового тиску, температури, витрати) на величину середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель, які утворюються при розпиленні рідини.

- Вперше експериментально отримано значення граничної температури нагріву крапель води при розпиленні відцентровою форсункою в контактних апаратах крапельного типу.

- Розроблено нову методику визначення дійсної міжфазної поверхні.

- Досліджено закономірності тепло- і масовіддачі при розпиленні рідини відцентровою форсункою.

- Отримано нові узагальнюючі залежності для розрахунку коефіцієнтів тепло- і масовіддачі при розпиленні води відцентровою форсункою.

Практичне значення одержаних результатів роботи. За результатами експериментальних досліджень розроблена нова методика розрахунку контактного тепломасообмінного апарату при розпиленні води відцентровими механічними форсунками.

Особистий внесок здобувача:

1. Підготовка експериментальної установки до проведення досліджень (проекування, складання й тестування) [1].

2. Проведення експериментальних досліджень характеристик факелу розпилю та тепломасовіддачі при розпиленні рідини на краплі відцентровими механічними форсунками [2, 3, 13-16].

3. Оброблення та узагальнення отриманих експериментальних даних характеристик факелу розпилю і тепломасовіддачі при розпиленні рідини на краплі відцентровими механічними форсунками [4-6, 8, 17-21].

4. Розроблення методики розрахунку контактного апарату при розпиленні рідини на краплі відцентровими механічними форсунками [7, 9-12].

Апробація роботи. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на: X, XI, XII, XIII, XIV Міжнародних науково-практичних конференціях аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, квітень 2012 – 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність в галузях економіки України» (Вінниця, 19 – 21 листопада 2013 р.; 17 – 19 листопада 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Холод в енергетиці і на транспорті» (Миколаїв, 24 – 25 вересня 2015 р.); VI Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 24 – 27 вересня 2015 р.); IX Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, 20 – 23 жовтня 2015р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование» (Харків, 27 – 28 квітня 2016 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 наукову працю, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 6 статей у наукових фахових виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз та 1 стаття у виданнях іноземних держав), 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та

4 патенти України на корисні моделі.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 75 найменувань та додатка. Загальний обсяг роботи становить 148 сторінок, з них 43 рисунки, 4 фото та 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, викладено наукову новизну і практичну цінність, представлені дані з апробації результатів роботи і особистий внесок здобувача у виконану роботу.

У **першому розділі** подано огляд відомих конструкцій контактних апаратів, обґрунтовано переваги крапельних контактних апаратів, виконано аналіз експериментальних і теоретичних досліджень характеристик розпилу рідини та процесів тепломасообміну при контактній конденсації пари з парогазової суміші.

Огляд літератури показав, що для найбільш поширених у промисловості протитоккових контактних апаратів з насадкою граничні режими роботи обмежені явищем захлинання, яке виникає при швидкостях газу 1,0 – 3,5 м/с. Наслідком цього є низька інтенсивність процесів тепломасообміну, а також мала питома продуктивність контактних апаратів. Збільшити інтенсивність процесів тепломасообміну можна при розпиленні рідини форсунками для прямої схеми руху теплоносіїв, що знімає обмеження за швидкістю газу.

Проведений огляд літератури показав наявність великої кількості робіт за характеристиками розпилювання рідини різними пристроями. Дані дослідження дозволяють зробити обґрунтований вибір типу форсунок, які були б достатньо економічними з погляду витрат енергії на створення факела розпилення необхідних параметрів та мали достатньо інформації щодо його характеристик (густини зрошення, кута розкриття факела форсунки і середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель рідини). Проте більшість досліджень проведені за умов розпилу палива в області високих надлишкових тисків води перед форсункою за 0,6 МПа і вище. Для зменшення затрат енергії на розпилення рідини в контактних утилізаційних апаратах крапельного типу, доцільно знизити надлишковий тиск води перед форсункою в діапазоні від 0,2 до 0,6 МПа. При цьому необхідно провести відповідні експериментальні дослідження характеристик факела розпилу в новому діапазоні надлишкових тисків води перед форсункою. Що стосується експериментальних і теоретичних досліджень процесів тепломасовіддачі від газової фази до одиночної краплі розпиленої рідини, то у доступній літературі є багато робіт і інформації. Проте дослідження процесів тепломасовіддачі від газової фази до факелу крапель рідини у крапельних контактних утилізаційних апаратах при конденсації пари у відомій літературі практично відсутні.

Завершує розділ постановка задач дослідження, що впливають з аналізу сучасного стану проблеми, наведеного в цьому розділі.

В **другому розділі** описано установки для проведення експериментів, методики проведення досліджень характеристик розпилу та процесів тепломасообміну, а також методики оброблення експериментальних даних.

Схему основної експериментальної установки (для дослідження процесів тепломасовіддачі) представлено на рис. 1. Основні складові частини установки такі:

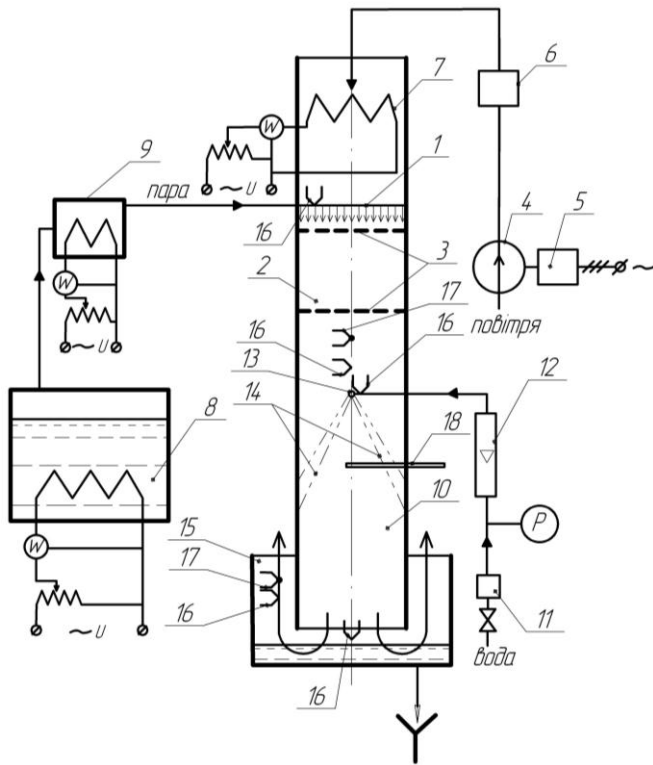


Рис 1. Схема експериментальної установки: 1 – розподільчий пристрій, 2 – камера змішування, 3 – перегородки, 4 – вентилятор, 5 – регулятор частоти, 6 – датчик витрат, 7 – нагрівач повітря, 8 – парогенератор, 9 – пароперегрівник, 10 – контактна камера, 11 – водяний фільтр, 12 – ротаметр, 13 – форсунка, 14 – факел розпилю, 15 – збірник води, 16 – термопари, 17 – «мокрі» термопари, 18 – зонд.

Водяна пара подавалася в камеру змішування з парогенератора 8. Для запобігання виносу крапельної вологи з парогенератора в його паровому об'ємі встановлювався сепаратор, а на паровій магістралі – пароперегрівник 9. Витрата водяної пари визначалась з теплової потужності нагрівачів котла за вирахуванням теплових втрат, визначених експериментально.

Вода в контактну камеру 10 підводилась із водопровідної мережі через регулюючий вентиль, водяний фільтр 11, ротаметр 12 і надходила на форсунку 13, за допомогою якої розпилювалася на краплі, що утворювали факел розпилю 14 у вигляді конуса. Нагріта вода стікала в камеру збору гарячої води 15 у нижній частині установки. Елементи експериментальної установки, що контактують із нагрітим середовищем, були теплоізовані.

Вимірювання температур середовищ у різних точках за перерізом і висотою робочого каналу здійснювалося за допомогою спеціального зонда, виконаного з тонкостінної фторопластової трубки діаметром 16 мм, усередині якої розміщувалися електроди термопар. Через отвори в корпусі контактної камери зонд встановлювався на заданій висоті і переміщувався в напрямку радіуса каналу. Один кінець трубки зонда мав відкритий торець, а другий під'єднувався до витяжного каналу вентилятора для відсмоктування і вимірювання параметрів парогазової суміші. Параметри

система подачі та підготовки повітря, пари і води, експериментальна контактна камера та система вимірювань. Досліди проводились в системі повітря – вода та парогазова суміш – вода. Газо-парова суміш із певним паровмістом моделювалася повітряно-паровою сумішшю, яка готувалася змішуванням потоку повітря, створюваного вентилятором, і водяної пари, яку отримували у спеціальному парогенераторі 8 та пароперегрівнику 9 і підводили до камери змішування через розподільчий пристрій 1. Повітря в робочий канал подавалось вентилятором 4, а витрата повітря регулювалася за допомогою регулятора частоти 5 і вимірювалася з використанням трубки Піто-Прандтля 6. Для підігрівання повітря використовувався електронагрівач 7. Регулювання та контроль потужності, яка підводилася до електронагрівача, здійснювались за допомогою регулятора напруги типу РНО-250-10 і ватметра типу Д-50162 відповідно.

Водяна пара подавалася в камеру змішування з парогенератора 8. Для запобігання виносу крапельної вологи з парогенератора в його паровому об'ємі встановлювався сепаратор, а на паровій магістралі – пароперегрівник 9.

парогазової суміші на вході й виході з контактної камери визначалися за допомогою «сухих» 16 і «мокрих» 17 термопар.

Дослідження коефіцієнтів тепло- і масовіддачі проводилися в умовах охолодження пароповітряної суміші краплями води при фіксованих значеннях тиску води перед форсункою і витраті повітря при зміні витрати пари, що забезпечувало задане значення об'ємної долі водяної пари в парогазовій суміші на вході в робочий канал. У дослідах величина поточного радіуса контактної камери r при вимірюванні температур змінювалося від 0 до R ($R = 150$ мм). Значення поточної висоти конуса розпилювання h змінювалося в діапазоні $(0 - H)$ мм. Висота конуса розпилю від зрізу сопла до стінок камери H змінювалася залежно від тиску води перед соплом у діапазоні $H = 167 \div 295$ мм.

Перед основними вимірюваннями проводилось тестування термовологодатчиків: у робочу ділянку подавався потік повітря, при цьому замірялись температури за «сухим» та «мокрим» термометром на вході й на виході з робочої ділянки. Ці покази порівнювались між собою та з показами «мокрого» та «сухого» ртутних термометрів, установлених у місці забору повітря вентилятором.

Після отримання первинних експериментальних даних перевірялось рівняння теплового балансу. Контрольно-вимірювальна апаратура та застосована методика проведення експериментів дозволили визначити коефіцієнти конвективної тепловіддачі з середньоквадратичною сумарною похибкою $\pm 16,8$ %, похибка визначення коефіцієнтів масовіддачі не перевищує ± 16 %.

Діапазон зміни режимних та геометричних параметрів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Діапазон зміни режимних та геометричних параметрів

№ з/п	Назва параметра	Діапазон зміни
1	Початкова температура парогазової суміші $t_{пг}$, °C	100÷105
2	Витрата сухого повітря V , м ³ /год	19,9÷105,5
3	Вміст вологи у ПГС на вході в установку d_1 , г/(кг с. пов.)	40÷326
4	Об'ємна доля водяної пари ε	0,05÷0,4
5	Початкова температура рідини t_p , °C	6÷15
6	Критерій Рейнольдса для води $Re_b = (w_y \cdot d_{3-2}) / \nu_b$	4278÷8271
7	Надлишковий тиск води перед форсункою P , МПа	0,2÷0,6
8	Витрата рідини G , кг/год	15÷29,4

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних досліджень характеристик факела розпилю рідини (густини зрошення, кута факела розпилю, середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель). Отримано дані розподілу безрозмірної густини зрошення по куту розкриття факелу форсунки при надлишковому тиску води перед форсункою 0,6 та 0,2 МПа (рис. 2). Із рис. 2а видно, що в центральній зоні факела ($\alpha^0 = 0 \dots \pm 20,1^\circ$) спостерігається практична відсутність рідини. При подальшому збільшенні абсолютної величини α^0 відношення $\Gamma / \Gamma_{ср}$ стрімко зростає, досягаючи свого максимуму при $\alpha^0 = \pm 32,3^\circ$, а далі так само стрімко спадає, досягаючи нуля на периферії факела при $\alpha^0 = 84^\circ$.

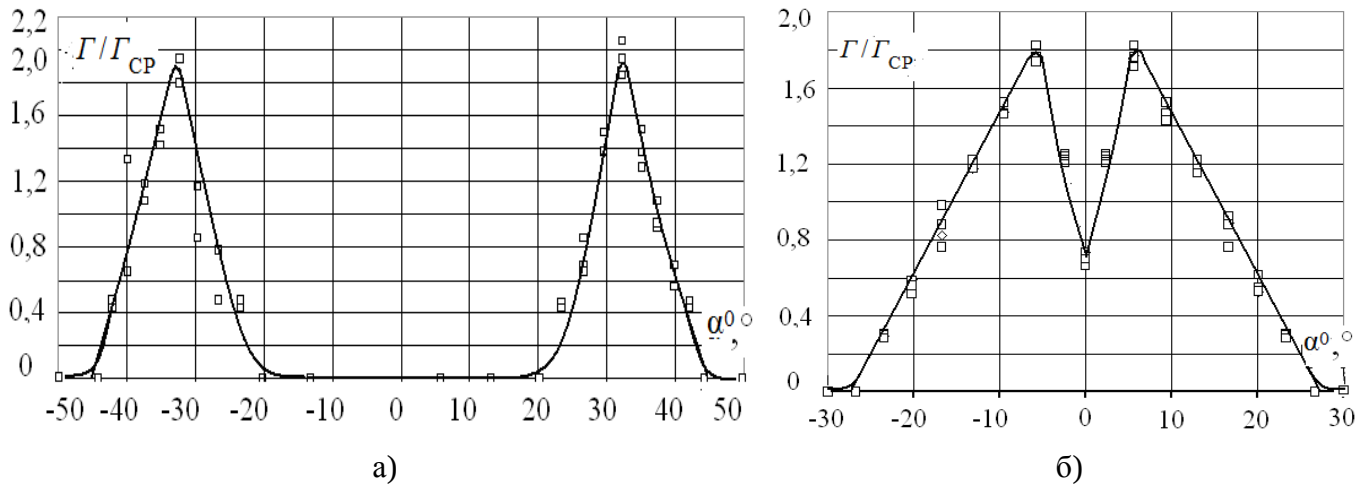


Рис. 2. Розподіл безрозмірної густини зрошення за кутом розкриття факела форсунки при надлишковому тиску води перед форсункою (а – 0,6 МПа; б – 0,2 МПа).

Зовсім іншу картину розподілу величини G/G_{CP} за кутом розкриття факела спостерігаємо у разі зниження надлишкового тиску перед форсункою до 0,2 МПа (рис. 2 б). Істотними відмінностями в порівнянні з попереднім випадком є помітне зменшення кута розкриття факела форсунки ($\alpha^0 = 54^\circ$) і наявність рідини в його центральній зоні ($G/G_{CP} = 0,67 - 0,73$ при $\alpha^0 = 0$).

Також проведено експериментальні дослідження залежності кута розкриття факела форсунки від надлишкового тиску води і температури в діапазоні від 9 до 51°C перед форсункою. Результати досліджень подано на рис. 3. Результати дослідів показали, що кут розкриття факела форсунки α^0 суттєво залежить від надлишкового тиску води перед нею і фактично не залежить від температури. За характером залежності $\alpha^0 = f(p)$ і зовнішнім виглядом конуса розпилювання розглянутий графік можна поділити на три ділянки.

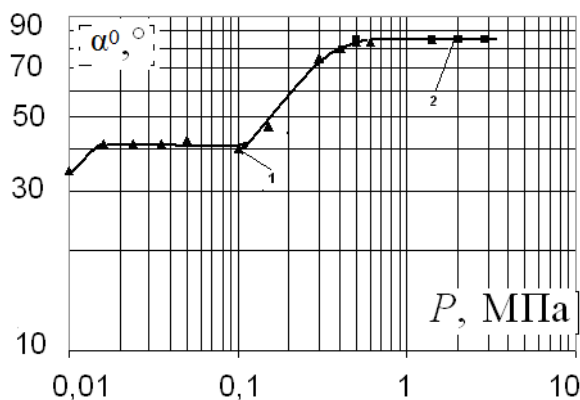


Рис.3. Залежність кута факела розпилю α^0 від надлишкового тиску води перед форсункою: 1 – експериментальні дані; 2 – літературні дані.

Перша ділянка відповідає діапазону надлишкових тисків $p = 0,01 - 0,1$ МПа. У цьому діапазоні зміни надлишкових тисків вода витікає із форсунки прозорим пузирем, замикається в одну точку на відстані 5 мм від зрізу сопла форсунки, в якій уміщається вершина конуса розпилення. При $p = 0,01$ МПа кут $\alpha^0 = 34,4^\circ$, при $p = (0,016 - 0,1)$ МПа кут α^0 постійний і дорівнює $\alpha^0 = 40,3^\circ$. В цьому діапазоні надлишкових тисків вершина конуса розпилювання утворюється від зрізу сопла форсунки і являє собою конус із кутом розкриття $\alpha^0 = 40,3^\circ$.

Друга ділянка графіка $\alpha^0 = f(p)$ (в інтервалі надлишкових тисків p від 0,1 до 0,5 МПа) характеризується зростанням кута α^0 від $40,3^\circ$ до 84° . Графік $\alpha^0 = f(p)$

при $0,1 < p < 0,5$ МПа для досліджуваної форсунки з достовірністю 0,99 апроксимується рівнянням:

$$\alpha^0 = 13,3 + 283,84p - 286,1p^2. \quad (1)$$

В рівнянні (1) розмірність p в МПа, α^0 – в градусах.

На третій ділянці при $p > 0,5$ МПа кут розкриття конуса розпилення факела форсунки α^0 залишається без змін і дорівнює $\alpha^0 = 84^\circ$.

Важливою характеристикою при дослідженні процесів тепломасообміну є середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель, який визначався за наступною формулою:

$$d_{3-2} = (\sum d_i^3 \Delta n_i) / \sum d_i^2 \Delta n_i, \quad (2)$$

де d_i – середній діаметр крапель у фракції, мкм; Δn – кількість крапель даної фракції. Для визначення величин d_i і Δn весь масив крапель розбивався на фракції за допомогою камери Горяєва, на поверхні якої знаходилася сітка з поділками відповідної фракції, і підраховувалась кількість крапель даної фракції. Величина d_{3-2} залежить від діаметра сопла, надлишкового тиску води перед форсункою і температури рідини. Весь масив отриманих експериментальних даних разом з літературними

даними для відцентрової форсунки аналогічної конструкції було узагальнено у вигляді залежності $A = f(We \times Re)$,

де $A = \frac{d_{3-2}}{0,061 Eu^{0,39} d_c}$ (рис. 4). Видно, що з достовірністю $R^2 = 0,88$ дослідні дані узагальнюються рівнянням:

$$\frac{d_{3-2}}{d_c} = 30,3 Eu^{0,39} (Re We)^{-0,51}. \quad (3)$$

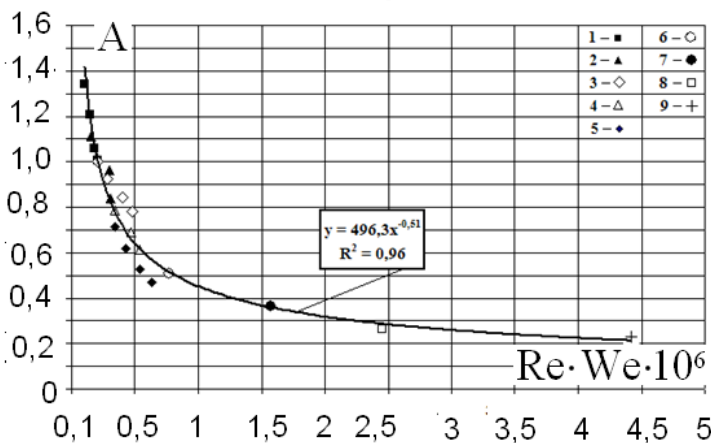


Рис. 4. Узагальнення експериментальних даних: 1-5 експериментальні дані, $d_c = 0,94$ мм:

1 – $p = 0,2$ МПа; 2 – $p = 0,3$ МПа; 3 – $p = 0,4$ МПа; 4 – $p = 0,5$ МПа; 5 – $p = 0,6$ МПа. 6-9 літературні дані: 6 – $p = 1,1$ МПа, $d_c = 0,94$ мм; 7 – $p = 2,45$ МПа; 8 – $p = 2,1$ МПа; $d_c = 1,58$ мм; 9 – $p = 2,1$ МПа, $d_c = 1,58$ мм.

Максимальне відхилення дослідних точок від узагальнюючої залежності не перевищує 18 %. Залежність справедлива при надлишковому тиску води перед форсункою $p = (0,2 - 2,45)$ МПа і її температурі $t = (9 - 51)^\circ\text{C}$.

Для отримання експериментальних значень середніх коефіцієнтів тепломасовіддачі між компонентами парогазокрапельної системи необхідно знати величину міжфазної поверхні. Для визначення величини міжфазної поверхні було розглянуто принципову схему задачі щодо руху крапель рідини в факелі розпилювання відцентрової форсунки, представлену на рис. 5.

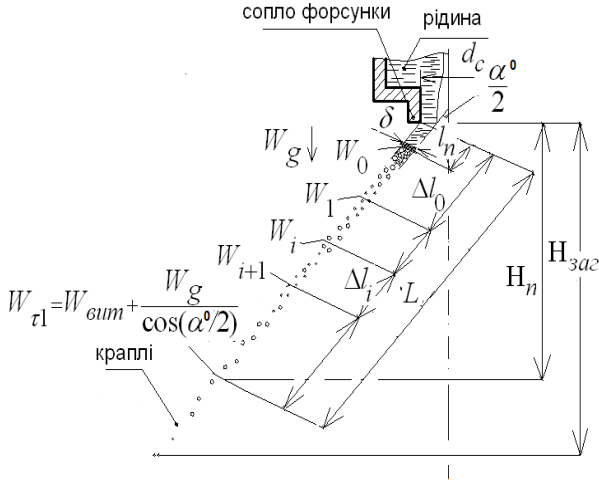


Рис. 5. Схема руху крапель в факелі розпилювання: d_c – діаметр сопла форсунки; α^0 – кореневий кут факела розпилювання; l_{Π} – довжина ділянки закінчення формування потоку крапель; δ – товщина плівки рідини; W_0 – початкова швидкість крапель; W_i – поточна швидкість крапель; W_g – швидкість газового потоку; l – поточна довжина шляху крапель; L – довжина шляху з неусталеним рухом крапель; $W_{\text{ВИТ}}$ – швидкість витання крапель; H_{Π} – висота ділянки неусталеного руху крапель; $H_{\text{ЗАГ}}$ – висота активної зони теплоутилізатора.

Вихідна залежність для визначення величини міжфазової поверхні F системи (суцільна газова фаза – краплі рідини) має наступний вигляд:

$$F = f_K n_K = f_K \frac{V_P}{V_K} = f_K \frac{V \tau_{\text{ЗАГ}}}{V_K} = \pi d_{3-2}^2 \frac{V \tau_{\text{ЗАГ}}}{\frac{1}{6} \pi d_{3-2}^3} = \frac{6V}{d_{3-2}} \tau_{\text{ЗАГ}} = \frac{6V}{d_{3-2}} (\tau_1 + \tau_2), \quad (4)$$

де f_K , V_K , n_K – відповідно площа поверхні, об'єм, кількість крапель; V_P – об'єм рідини в активній зоні апарату; V – об'ємна витрата рідини на вході в розпилювач; $\tau_{\text{ЗАГ}}$ – загальний час перебування крапель води в активній зоні реалізації процесів переносу; d_{3-2} – середній об'ємно-поверхневий діаметр крапель; τ_1 – час неусталеного руху крапель рідини; τ_2 – час руху крапель з усталеною швидкістю. Центральним місцем аналізу для визначення величини поверхні розділу фаз є визначення часу перебування крапель в активній зоні апарату. Для вирішення питання про час перебування крапель на першій ділянці їх руху в активній зоні переносу τ_1 необхідно визначитися зі швидкостями їх руху і шляхом, який вони повинні подолати, рухаючись у цій зоні. З цією метою було використано рівняння руху:

$$m \frac{dW_{\tau}}{d\tau} = mg + \xi \Omega \frac{\rho_g k^2 W_{\tau}^2}{2}, \quad (5)$$

де $m = (\pi d_{3-2}^3 \rho_B) / 6$ – маса краплі рідини; W_{τ} – швидкість руху краплі в момент τ ; g – прискорення поля гравітації (рух газового середовища і рух крапель направлені вниз); ξ – коефіцієнт опору газового середовища; $\Omega = (\pi d_{3-2}^2) / 4$ – міделевий переріз краплі; ρ_g – густина газового середовища; $k = (W_{\tau} + W_g) / W_{\tau}$; W_g – швидкість газового потоку в апараті. При вирішенні рівняння (5) щодо часу руху крапель необхідно врахувати залежність коефіцієнту опору від швидкості руху краплі, тобто функцію $\xi = f(\text{Re})$. Це надто ускладнює інтегрування рівняння (5). Тому було прийняте рішення про розбивку шляху руху крапель на окремі ділянки, в межах яких середня швидкість руху крапель, а відповідно, і коефіцієнт опору ξ мали постійні значення. Це можливо, якщо значення $\bar{\xi}$ відрізняється від ξ_i і від ξ_{i+1} (відповідно при нових границях інтегрування) не більше, наприклад, ніж на (10 – 15) %. Так само можна

повестися і з коефіцієнтом k , замінивши його на $\bar{k}$, який при інтегруванні в нових межах буде вважатися таким, що не залежить від величини $(W_\tau + W_g)$ (при інтегруванні приймається, що $W_g = \text{const}$). Величина τ_2 визначалась за формулою:

$$\tau_2 = \frac{H_{3\Gamma} - H_{\Pi}}{W_{\tau_1} \cos(\alpha^0 / 2)}, \quad (6)$$

У результаті вирішення даної задачі було отримано залежності сумарної величини поверхні крапель F і швидкості їх руху W від шляху їх пробігу L , які представлено на рис. 6.

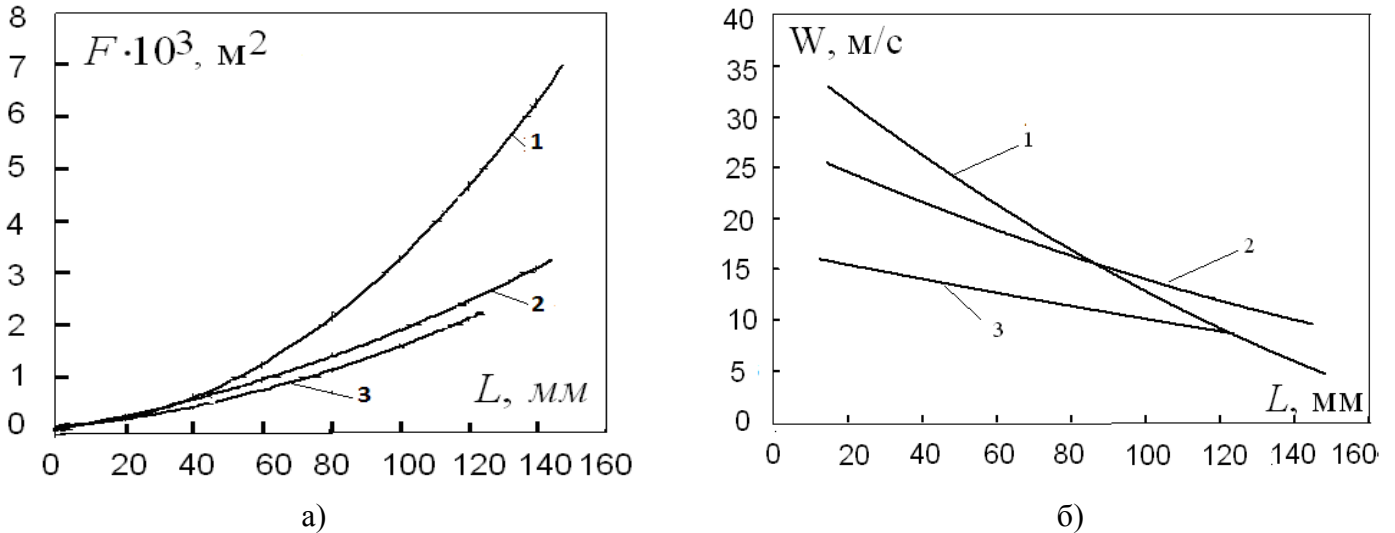


Рис. 6. Залежність величини: а – міжфазної поверхні конуса розпилення F , б – швидкості руху крапель W від довжини їх пробігу L при різних надлишкових тисках води перед форсункою (1 – $P = 0,6$ МПа; 2 – $P = 0,4$ МПа; 3 – $P = 0,2$ МПа).

Четвертий розділ присвячено результатам експериментального дослідження процесів тепломасообміну при конденсації водяної пари з парогазової суміші. При цьому досліджено параметричні границі ефективного використання механічної від-

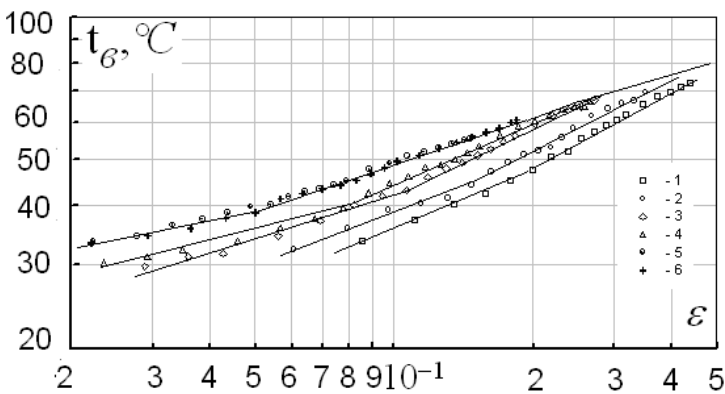


Рис. 7. Залежність температури нагрітої води від об'ємної долі водяної пари при витратах сухого повітря: 1 – $19,9 \text{ м}^3/\text{год}$; 2 – $27,9 \text{ м}^3/\text{год}$; 3 – $40,5 \text{ м}^3/\text{год}$; 4 – $50,0 \text{ м}^3/\text{год}$; 5 – $80,1 \text{ м}^3/\text{год}$; 6 – $105,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

центрової форсунки. На рис. 7 наведено експериментальну залежність температури води на виході з апарату, $t_b, ^\circ\text{C}$ від об'ємної долі водяної пари ε (або об'ємного витратного паровмісту), при надлишковому тиску води перед форсункою $P = 0,6$ МПа і різних об'ємних витратах сухого повітря. Видно, що температура води на виході з установки зростає як зі збільшенням об'ємної витрати повітря, так і зі збільшенням об'ємної долі водяної пари ε . При цьому, в залежності від об'ємної долі водяної пари, спостерігається кілька характерних ділянок. При малому вмісті водяної пари в суміші (малому значенні ε) їх кон-

денсація відбувається тільки на початковій ділянці конуса розпилення. На іншій ділянці конуса розпилення нагрів рідини здійснюється за допомогою конвективної тепловіддачі від парогазової суміші, тому нагрівання крапель води характеризується слабкою залежністю температури води від паровмісту суміші. Зі збільшенням величини ε область ділянки конденсації збільшується і поширюється на весь конус розпилення. З цього моменту вся система крапель працює в режимі конденсації водяної пари і це проявляється на графіку більш сильним впливом на t_b об'ємної долі водяної пари. Нарешті, при подальшому збільшенні ε температура крапель води в кінці конуса розпилення досягає граничного значення і степінь зростання її сповільнюється у зв'язку з тим, що, досягнувши значення температури мокрого термометра, краплі води в кінці конуса розпилення починають випаровуватися. Температура води на цій останній характерній ділянці (як це видно з графіка) не залежить від витрати повітря (починаючи зі значення $80 \text{ м}^3/\text{год}$ і вище) і залежить лише від об'ємної долі водяної пари.

Експериментальні дані для граничної температури нагріву води, отримані при різних надлишкових тисках води перед форсункою, представлені на рис. 8.

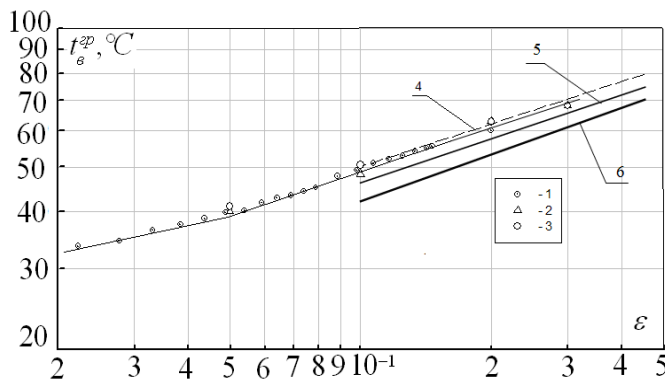


Рис. 8. Залежність максимальної температури нагріву води від об'ємної долі водяних парів при надлишковому тиску води перед форсункою: 1 – $P=0,6 \text{ МПа}$; 2 – $P=0,4 \text{ МПа}$; 3 – $P=0,2 \text{ МПа}$; 4 – кільця Рашига, 5 – проточний барботажний шар, 6 – з супутнім висхідним рухом парогазової суміші і плівки рідини.

Видно, що гранична температура нагріву води не залежить від надлишкового тиску води перед форсункою. Отриману експериментальну залежність для газокрапельної системи порівняно з відповідними залежностями для інших газорідних систем, що мають місце в різних конструкціях контактних апаратів. При цьому використані залежності для протиточної плівкової системи з насадкою у вигляді кілець Рашига (графік 4), для системи з проточним барботажним шаром (графік 5) і для системи з супутнім висхідним рухом у вертикальній трубі парогазової суміші та плівки рідини (графік 6). Із зіставлення видно, що можливості для максимального нагріву води в газокрапельному апараті вище, ніж в апаратах із проточним барботажним шаром і з висхідним супутнім потоком парогазової суміші та плівки рідини і фактично збігаються з можливістю нагріву у протитоковому плівковому насадочному апараті. Отримана залежність для граничної температури нагріву води може бути з вірогідністю $R^2 = 0.92$ апроксимована рівняннями:

$$\text{при } \varepsilon = (0,02 - 0,05): \quad t_g^{\text{сп}} = 65,6\varepsilon^{0,18}; \quad (7)$$

$$\text{при } \varepsilon = (0,05 - 0,3): \quad t_g^{\text{сп}} = 102,1\varepsilon^{0,33}. \quad (8)$$

Отримані експериментальним шляхом залежності (7 та 8) для граничної температури нагріву води дозволяють визначити параметричні границі ефективного

використання конкретної форсунки при проектуванні контактного утилізатора теплоти газокрапельного типу.

У загальному випадку, для іншого типорозміру форсунки, межі цієї області можуть бути розраховані приблизно, з використанням залежностей (7 і 8), на підставі рівняння теплового балансу:

$$G_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}}^{\text{сп}} - t_1) = G_{\text{г}}^{\text{max}} (h_{\text{вх}} - h_{\text{вих}}), \quad (9)$$

де $G_{\text{в}}$ – витрата води для обраної форсунки при заданому надлишковому тиску води перед форсункою; $c_{\text{в}}$ – теплоємність води; $t_{\text{в}}^{\text{сп}}$ – гранична температура нагріву води, визначена з рівнянь (7 та 8); t_1 – температура води на вході в апарат; $G_{\text{г}}$ – масова витрата сухих газів; $h_{\text{вх}}$ і $h_{\text{вих}}$ – ентальпія парогазової суміші на вході і виході з апарату.

Ентальпія $h_{\text{вх}}$ може бути розрахована за значеннями температури і об'ємної долі водяної пари в суміші на вході в апарат з урахуванням співвідношення між об'ємною долею водяної пари ε і вологовмістом d суміші:

$$d = \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{г}}}, \quad (10)$$

а ентальпія $h_{\text{вих}}$ – за температурою і вологовмістом суміші на виході з апарату. При цьому, як показують дослідження, температура парогазової суміші на виході всього на 1 – 3°C перевищує значення температури води на виході з апарату, а вологовміст суміші з достатньою точністю може бути визначений за $h - d$ діаграмою вологого повітря при температурі суміші на виході на лінії насичення $\varphi = 100\%$. Тоді, максимальна масова витрата сухих газів на одну форсунку може бути визначена за формулою:

$$G_{\text{г}}^{\text{max}} = \frac{G_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}}^{\text{сп}} - t_1)}{(h_{\text{вх}} - h_{\text{вих}})}. \quad (11)$$

На рис. 9 представлено профілі температур середовищ по площі поперечного перерізу контактної камери (температури води і температури «сухого» термометра газової суміші). Ці температури при різних значеннях об'ємної долі ε пари в парогазовій суміші вимірювалися при фіксованих значеннях координат по висоті h і радіусу камери r .

Якісно картина розподілу температур середовищ за перетином камери фактично мало чим відрізняється при зміні об'ємної долі пари в газовій суміші в межах $\varepsilon = 0,1 - 0,3$. Відмінність полягає лише в тому, що при переході на більш високе значення величини ε (збільшенні вмісту вологи в повітрі на вході в контактну камеру) відбувалося, в результаті більш інтенсивних процесів конденсації, підвищення рівня температур у камері. Так, при послідовному підвищенні ε з величини 0,1 до 0,2 і потім до 0,3 рівні температур, відповідно, змінювалися на осі камери (при $r = 0$) від 40–45 до 50–57 і до 58–66°C. Одночасно біля стінки камери (при $r = 150$ мм) від-

повідне підвищення рівня температур становило від 42 – 68 до 53 – 79 і потім до 62 – 83°C.

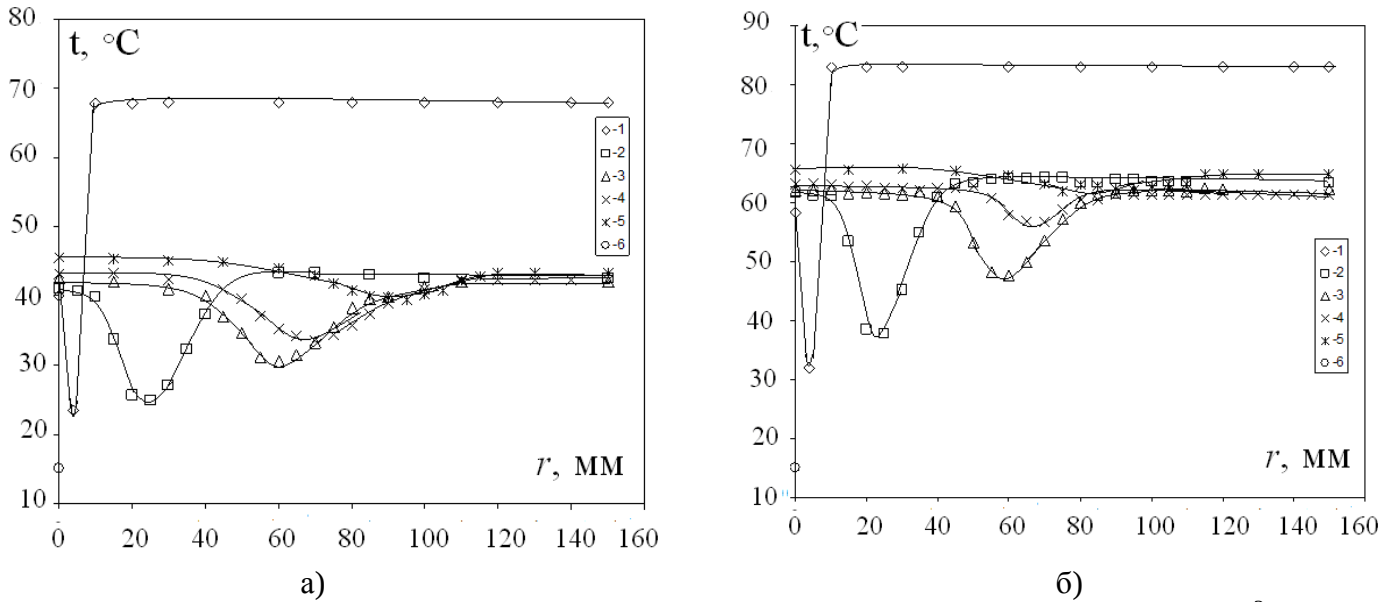


Рис. 9. Розподіл температури середовищ по перерізу камери для $P = 0,6$ МПа і $V = 19,5$ м³/год при різних об'ємних долях пари в газовій суміші: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$ і величинах h : 1 – $h = 11$ мм; 2 – 40 мм; 3 – 90 мм; 4 – 110 мм; 5 – 190 мм; 6 – температура води перед форсункою ($h = 0$).

На графіках розподілу температур видно також наявність п'яти послідовно розташованих мінімумів значень температур, що утворюють графічно своєрідні впадини при п'яти фіксованих значеннях h від 11 до 190 мм і значеннях r від 0 до 150 мм (змінюються з кроком 5 мм при кожному з цих фіксованих значень h). За цими вузловими точками камери змішування і переміщався датчик температури при зондуванні її розподілу. Помітно також, що ці мінімуми значень температур зростають з ростом h , а самі впадини з ростом h і r стають ширшими. Знаючи характеристики дослідної форсунки, і зіставивши їх з отриманим розподілом температур середовищ в камері, отримали, що розподіл температур в зазначених екстремальних вузлах є не що інше, як розподіл температури крапель води в різних перетинах конуса розпилювання. А мінімальна температура в цих вузлах практично дорівнює температурі крапель на осі дотичної конуса розпилу. Маючи на увазі, що густина зрошення на осі дотичної конуса розпилу в 2,2 рази вище середньоарифметичної густини зрошення, що припадає на весь кут розкриття факела, в подальшому було прийнято, що температура крапель на осі дотичної факела дорівнює середній температурі нагріву води при відповідних координатах $[h_i; r_i]$. Ця температура і була прийнята в подальших розрахунках коефіцієнтів переносу як середня температура нагріву крапель води.

Розподіл середніх температур «сухого» термометра t_c^{CP} для пароповітряної суміші та крапель води $t_B^{\min}$ за висотою камери змішання, що характеризує зміну конвективного потоку теплоти, при надлишковому тиску води перед форсункою $P = 0,6$ МПа, $V = 19,5$ м³/год і різних об'ємних долях пари в суміші (а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$) представлено на рис. 10.

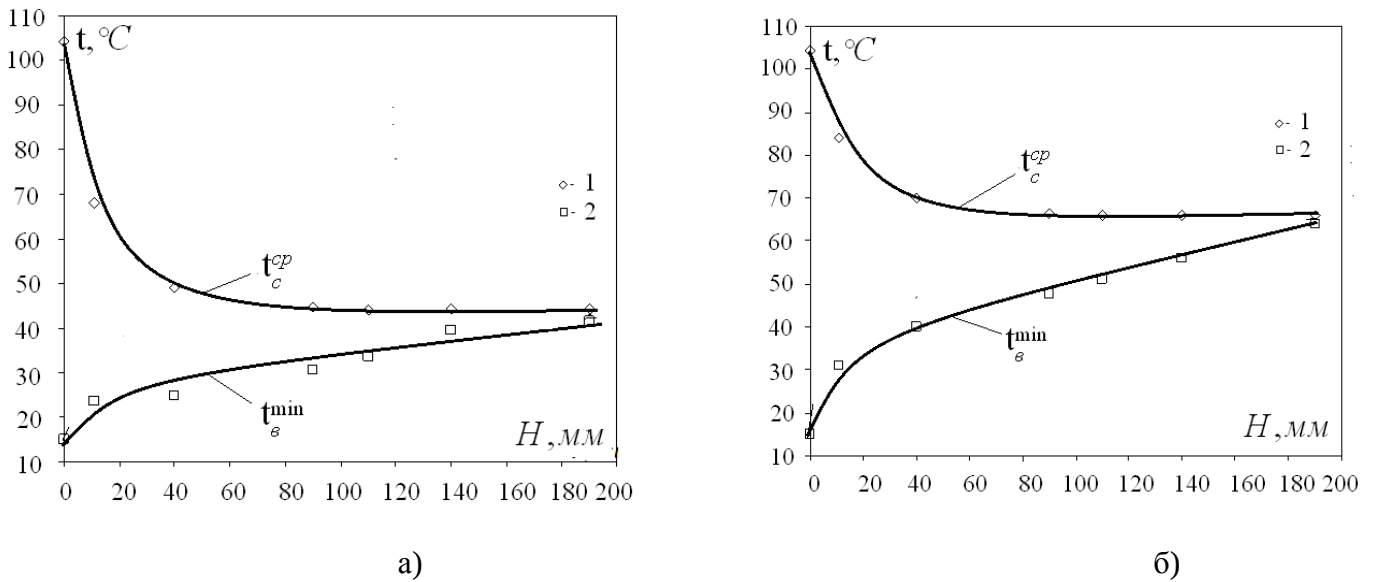


Рис. 10. Розподіл середніх температур «сухого» термометра для парогазової суміші та крапель води за висотою камери змішування при надлишковому тиску води перед форсункою $P = 0,6$ МПа, $V = 19,5$ м³/год і при різних об'ємних долях пари в суміші: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$.

Середня температура «сухого» термометра для парогазової суміші на певній висоті камери, t_c^{cp} , розраховувалася як середньоінтегральна величина по поперечному перерізу камери.

Видно, що якісно картина розподілу цих температур за висотою камери зі зміною величини ε у діапазоні від 0,1 до 0,3 не змінюється. При всіх значеннях ε у зазначеному діапазоні її зміни зниження середньої температури газової суміші практично припиняється на висоті $H = 70$ мм (що свідчить про досить інтенсивні процеси переносу, які відбуваються в даній системі саме при $H < 70$ мм). Починаючи з цієї висоти, температура парогазової суміші з ростом величини H практично залишається незмінною. З ростом значення ε підвищується тільки рівень середньої температури парогазової суміші при $H > 70$ мм. Так, при $H = 190$ мм і $\varepsilon = 0,1$ (рис. 4.7 а) $t_c^{cp} \approx 45^\circ\text{C}$, а при $\varepsilon = 0,3$ (рис. 4.7, б) $t_c^{cp} \approx 64^\circ\text{C}$.

При проведенні зондування контактної камери вимірювали також температуру «мокрого» термометра для пароповітряної суміші, що дозволяє визначати значення вмісту вологи в конкретних точках камери. Середній вологовміст в i -му перерізі камери визначали аналогічно визначенню середньої температури «сухого» термометра суміші, про яку згадувалося вище.

Обробляючи експериментальні дані, конвективну складову $Q_{\text{конв}}$ загального теплового потоку Q визначали як різницю двох величин:

$$Q_{\text{конв}} = Q - Q_{\text{конд}} \approx Q - G_{\text{с.пов}}(d_1 - d_2) \cdot r, \quad (12)$$

де $Q_{\text{конд}}$ – конденсаційна складова загального теплового потоку; $G_{\text{с.пов}}$ – масова витрата сухого повітря на вході в установку; d_1, d_2 – відповідно середній вологовміст на вході й виході з розглянутої ділянки; r – прихована теплота пароутворення.

Величина Q визначалася з теплового балансу для води. Величина r – за середнім парціальним тиском водяної пари в суміші газу на даній ділянці довжини пробігу крапель ($P_{II} = \frac{Bd_{CP}}{0,622 + d_{CP}}$). Середній коефіцієнт конвективної тепловіддачі α_K , віднесений до середньологарифмічного температурного напору $\Delta\bar{T}$, на дослідних ділянках (які послідовно відповідали довжині пробігу та міжфазній поверхні крапель для $h = 11, 40, 90$ і 110 мм) визначали за залежністю:

$$\alpha_K = \frac{Q_{KOHБ}}{F\Delta\bar{T}}. \quad (13)$$

Середні коефіцієнти конвективної тепловіддачі від парогазової суміші до факелу крапель в залежності від довжини шляху пробігу крапель і від швидкості руху крапель на виході з відповідної ділянки представлені на рис.11.

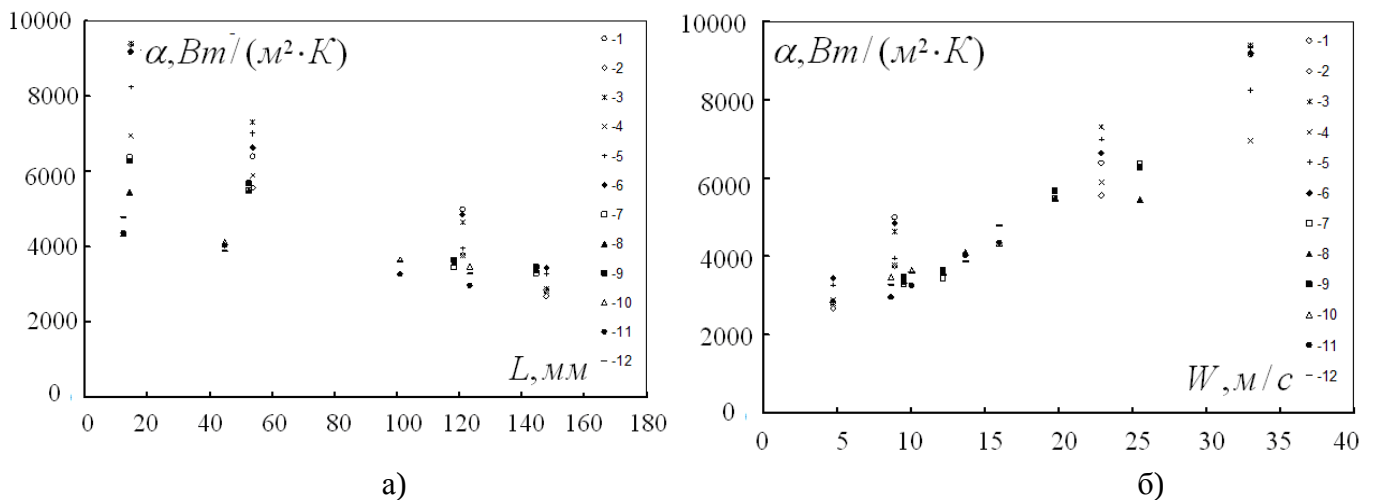


Рис. 11. Середні коефіцієнти конвективної тепловіддачі від парогазової суміші до факелу крапель: а – в залежності від довжини шляху пробігу крапель, б – від швидкості руху крапель на виході з відповідної ділянки: 1, 2, 3 – $P = 0,6$ МПа, $V = 19,5$ м³/год (1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – $0,2$; 3 – $0,3$); 4, 5, 6 – $P = 0,6$ МПа; $\varepsilon = 0,15$ (4 – $V = 20,08$ м³/год; 5 – $26,9$; 6 – $45,9$); 7, 8, 9 – $P = 0,4$ МПа; $V = 19,7$ м³/год (7 – $\varepsilon = 0,08$; 8 – $0,18$; 9 – $0,25$); 10, 11, 12 – $P = 0,2$ МПа; $V = 19,5$ м³/год (10 – $\varepsilon = 0,12$; 11 – $0,22$; 12 – $0,35$).

Видно, що з ростом величин L і W значення α_K відповідно зменшуються і зростають. Ці обставини логічно пояснюються, в свою чергу, характером змін величин F і W в залежності від зміни L . Помітно також досить істотне розшарування значень $\alpha_K = f(L)$ при різних режимних параметрах, які зменшуються при розгляді залежності $\alpha_K = f(W)$ (відповідно від ± 33 % до ± 22 %).

На рис. 12 представлено узагальнення експериментальних даних з конвективної тепловіддачі від пароповітряної суміші до крапель рідини, що створює власне конус розпилювання після форсунки контактного утилізатора.

Видно, що узагальнювальний графік 1 задовільно апроксимує (з вірогідністю $0,92$; максимальне відхилення $\pm 20\%$) експериментальні точки, отримані при всіх досліджуваних режимних параметрах роботи апарату. Тут же для порівняння наведено графіки 2 і 3, що характеризують інтенсивність тепловіддачі до окремої краплі

води, що рухається, і побудовано стосовно режимних параметрів для наших дослідів.

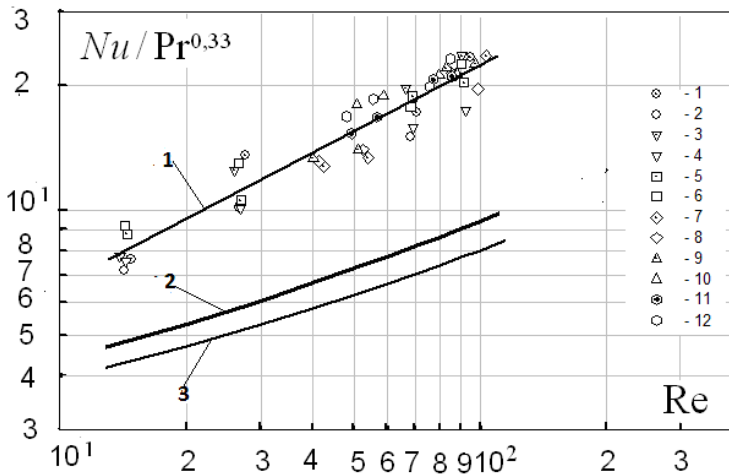


Рис.12. Узагальнення експериментальних даних (графік 1) з тепловіддачі: графік 2 – розрахунок за формулою Брукнера - Маттіка; графік 3 – розрахунок за формулою Ренца - Маршалла: 1, 2, 3 – $P=0,6$ МПа, $V=19,5$ м³/год (1 – $\varepsilon=0,1$; 2 – $0,2$; 3 – $0,3$); 4, 5, 6 – $P=0,6$ МПа; $\varepsilon=0,15$ (4 – $V=20,08$ м³/год; 5 – $26,9$; 6 – $45,9$); 7, 8, 9 – $P=0,4$ МПа; $V=19,7$ м³/год (7 – $\varepsilon=0,08$; 8 – $0,18$; 9 – $0,25$); 10, 11, 12 – $P=0,2$ МПа; $V=19,5$ м³/год (10 – $\varepsilon=0,12$; 11 – $0,22$; 12 – $0,35$).

краплі, що рухається в сукупності крапель, які прилягають до неї. Отже, узагальнююче рівняння для середнього коефіцієнта конвективної тепловіддачі від парогазової суміші до ансамблю крапель води (конусу розпилювання) має вигляд:

$$Nu = 1,97 Re^{0,53} Pr^{0,33}. \quad (14)$$

Залежність (14) справедлива при числах $Re = 13 \div 104$. $Re = \frac{Wd_{3-2}}{\nu}$, $Nu = \frac{\alpha d_{3-2}}{\lambda}$.

На відміну від коефіцієнтів конвективної тепловіддачі, величина яких, як випливає з рівняння (14), прямопропорційна швидкості руху крапель і обернено пропорційна їх діаметру, на інтенсивність процесу масовіддачі також виявляє помітний вплив величина об'ємного вмісту пари в пароповітряній суміші.

На рис. 13 представлені значення середнього коефіцієнта масовіддачі β в функції величин L і W для відповідних дослідних ділянок.

Тут же для порівняння представлений побудований в режимних параметрах дослідів графік 1, що характеризує інтенсивність масовіддачі до окремої краплі води, що рухається.

Цей графік побудовано за залежністю, подібною до залежності Ренца - Маршалла для випадку тепловіддачі до окремої краплі і також широко використовується в літературі при створенні математичних моделей при чисельному дослідженні схожих систем і задач. Видно, що, як і при дослідженні інтенсивності тепловіддачі, залежності $\beta = f(L)$ і $\beta = f(W)$ характеризуються великим (до $\pm 40\%$) розкидом (за ординатою системи координат) дослідних даних при різних режимних параметрах.

Графік 2 побудовано за залежністю Брукнера - Маттіка, яка з великого числа кореляцій для коефіцієнта тепловіддачі до окремої краплі, дає найбільше його значення. Графік 3 побудовано за співвідношенням Ренца - Маршалла, який, мабуть, частіше за інших використовується в роботах для дослідження коефіцієнтів переносу в аналогічних системах, наприклад, при створенні математичних моделей. Видно також, що інтенсивність тепловіддачі від парогазової суміші до сукупності крапель у вигляді конуса розпилювання помітно перевищує її значення в разі руху одиначної краплі. Цей факт пояснюється додатковим, в порівнянні з одиночною краплею, турбулізаційним впливом на пограничний шар навколо окремої

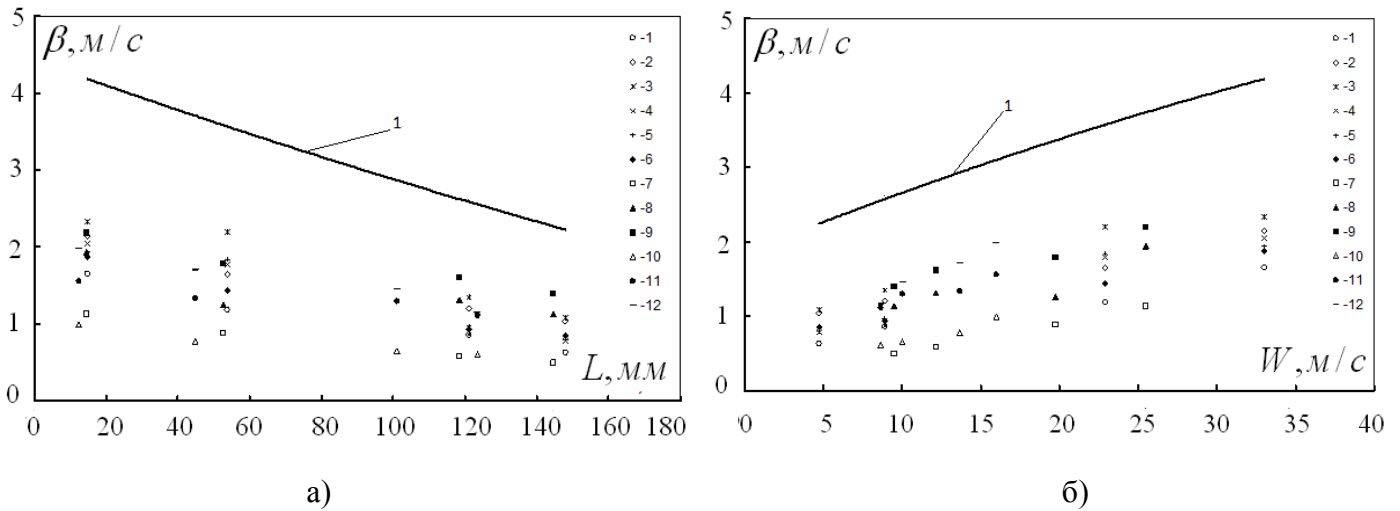


Рис. 13. Середні коефіцієнти масовіддачі від парогазової суміші до факелу крапель в залежності: а – від довжини шляху пробігу крапель б – від швидкості руху крапель на виході з відповідної ділянки. Графік 1 – розрахунок за формулою Ренца - Маршалла: 1, 2, 3 – $P = 0,6$ МПа, $V = 19,5$ м³/год (1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – 0,2; 3 – 0,3); 4, 5, 6 – $P = 0,6$ МПа; $\varepsilon = 0,15$ (4 – $V = 20,08$ м³/год; 5 – 26,9; 6 – 45,9); 7, 8, 9 – $P = 0,4$ МПа; $V = 19,7$ м³/год (7 – $\varepsilon = 0,08$; 8 – 0,18; 9 – 0,25); 10, 11, 12 – $P = 0,2$ МПа; $V = 19,5$ м³/год (10 – $\varepsilon = 0,12$; 11 – 0,22; 12 – 0,35).

Помітно також, що інтенсивність масовіддачі до окремої краплі води, що рухається (графік 1), вище, ніж до ансамблю крапель у конусі розпилювання. Фізично цей факт можна пояснити своєрідним розподілом всієї маси водяної пари в суміші до сукупності крапель, що приводить в кінцевому підсумку до зниження частки па-

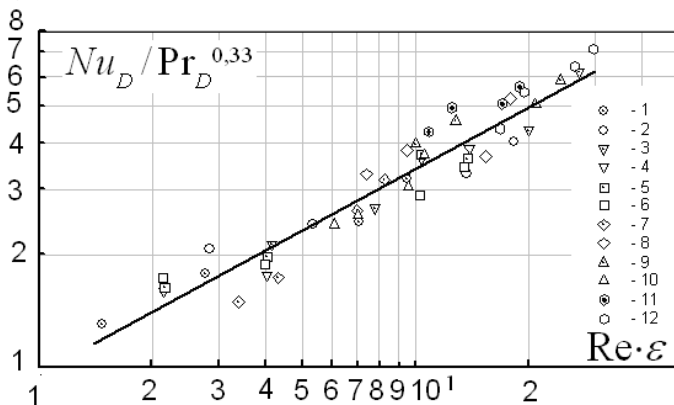


Рис.14. Узагальнення експериментальних даних з масовіддачі: 1, 2, 3 – $P = 0,6$ МПа, $V = 19,5$ м³/год (1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – 0,2; 3 – 0,3); 4, 5, 6 – $P = 0,6$ МПа; $\varepsilon = 0,15$ (4 – $V = 20,08$ м³/год; 5 – 26,9; 6 – 45,9); 7, 8, 9 – $P = 0,4$ МПа; $V = 19,7$ м³/год (7 – $\varepsilon = 0,08$; 8 – 0,18; 9 – 0,25); 10, 11, 12 – $P = 0,2$ МПа; $V = 19,5$ м³/год (10 – $\varepsilon = 0,12$; 11 – 0,22; 12 – 0,35).

ри, яку одержує конкретна крапля в сукупності і, отже, до зниження градієнта концентрації пари в її пограничному шарі. А остання обставина призводить, відповідно до закону Фіка, до зниження інтенсивності масовіддачі.

Узагальнення експериментальних даних з масовіддачі від пароповітряної суміші до крапель рідини, що знаходяться в конусі розпилювання, наведено на рис. 13. По осі ординат графіка, зображеного на цьому рисунку, відкладено співвідношення $Nu_D / Pr_D^{0,33}$, по осі абсцис – добуток $Re \cdot \varepsilon$. Узагальнююча залежність має вигляд:

$$Nu_D = 0,96 Re^{0,55} Pr_D^{0,33} \varepsilon^{0,55}. \quad (15)$$

Видно, що узагальнюючий графік апроксимує (з достовірністю 0,92, максимальне відхилення ± 20 %) всі дослідні точки, отримані при проведенні експериментальних досліджень. Залежність справедлива при числах $Re = 13 \div 104$ і $\varepsilon = 0,05 \div 0,45$. $Re = (Wd_{3-2})/\nu$, $Nu_D = (\beta d_{3-2})/D$.

У результаті вказаного комплексу робіт створено методику теплового розрахунку контактного газокрапельного утилізатора теплоти низькотемпературних відхід-

них газів, яка враховує реальні умови протікання процесів переносу в розглянутій двухфазній системі. Наведена процедура теплового розрахунку утилізаційної установки дозволяє при заданих параметрах відхідних газів і води на вході отримати тип і кількість розпилювачів для генерування крапель води, виконати компоновку у штатному коробі для відводу газів, розрахувати параметри теплоносіїв на виході з установки і визначити її теплопродуктивність.

ВИСНОВКИ

У результаті експериментальних досліджень процесів тепломасообміну в системі «парогазова суміш – краплі рідини» сформульовані та обґрунтовані наукові за-
сади створення тепломасообмінних апаратів нового покоління, впровадження яких забезпечить суттєву економію матеріальних та енергетичних ресурсів.

Отримані результати експериментальних досліджень характеристик розпилю та процесів тепломасообміну для парогазової суміші та крапель розпиленої рідини дозволяють зробити наступні висновки:

1. Отримано експериментальну залежність для кута розкриття факелу в новому діапазоні надлишкових тисків води перед форсункою 0,2 до 0,6 МПа, яка дозволяє розраховувати його габарити.

2. Встановлено характер впливу вхідних параметрів води (надлишкового тиску, температури, витрати) на величину середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель, які утворюються при розпиленні рідини.

3. Отримано узагальнюючу залежність для розрахунку величини середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель при розпиленні рідини на досліджуваній форсунці.

4. В результаті теоретичного аналізу руху крапель рідини у факелі розпилювання відцентрової форсунки і використання експериментальних даних щодо середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель запропоновано методику визначення дійсної міжфазної поверхні тепломасообміну в контактних газорідних апаратах крапельного типу, яку було використано при дослідженні процесів тепломасообміну для визначення коефіцієнтів переносу.

5. Встановлено експериментальну залежність для максимальної температури нагріву води на виході з газокрапельного контактного апарату від об'ємної долі водяної пари в парогазовій суміші в діапазоні 0,05–0,45, характерних для умов роботи контактних утилізаторів теплоти відхідних газів енергетичних пристроїв.

6. Показано, що гранична температура нагріву води залежить лише від об'ємної долі водяної пари і не залежить від надлишкового тиску води перед форсункою в дослідженому діапазоні (0,2–0,6) МПа, характерному для звичайного режиму роботи водопровідної мережі.

7. Показано можливість використання отриманих залежностей для розрахунку параметричної області ефективної роботи контактного утилізатора теплоти подібної конструкції, який гарантує відсутність режиму випаровування крапель води.

8. Отримані експериментальні залежності коефіцієнтів переносу від парогазової суміші до системи крапель води відцентрової форсунки у функції режимних параметрів роботи дослідного контактного апарату.

9. Показано, що інтенсивність тепловіддачі від парогазової суміші до сукупності крапель у вигляді конусу розпилу вища, ніж для випадку руху одиночної краплі, що пояснюється турбулізаційним впливом на пограничний шар навколо окремої краплі сусідніх, які рухаються в ансамблі крапель, котрі примикають до неї.

10. Показано, що інтенсивність масовіддачі від парогазової суміші до сукупності крапель нижча, ніж для випадку руху одиночної краплі. Це пов'язано із змінною розподілу потоку маси водяної пари до кожної із крапель, що призводить до зменшення градієнта концентрації пари в пограничному шарі.

11. Отримані узагальнюючі залежності для середніх коефіцієнтів тепломасовіддачі придатні для створення методики розрахунку подібних контактних апаратів крапельного типу. Дані залежності враховують умови розвитку процесів переносу в реальній газокрапельній системі утилізатора на відміну від літературних залежностей для одиночної краплі.

12. Створено методику теплового розрахунку газокрапельного контактного утилізатора теплоти низькотемпературних відхідних газів, яка враховує умови протікання процесів переносу в розглянутій двофазній системі.

Результати дисертаційної роботи передані в ТОВ "Інженерний центр "АЛМІС" для використання при виконанні технічного проекту крапельного контактного апарату, а також використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Тепломасообмінні процеси і апарати».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Безродный М. К. Некоторые характеристики распыла центробежных форсунок контактных утилизаторов отходящих газов капельного типа [Текст] / М. К. Безродный, Н. Н. Голяяд, П. А. Барабаш, А. Ю. Рачинский, А. Б. Голубев // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т.35. – №6. С. 31-38. (Включено до GEOREF).

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень характеристик факела розпилу та узагальнення експериментальних досліджень.

2. Безродный М. К. Влияние входных параметров воды на тонкость распыла центробежных форсунок [Текст] / М. К. Безродный, Н. Н. Голяяд, А. Ю. Рачинский, П. А. Барабаш, А. Б. Голубев // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №2. – С. 23-30. (Включено до РИНЦ, Google Scholar).

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних досліджень.

3. Безродный М. К. До визначення поверхні тепломасообміну в контактних теплоутилізаторах крапельного типу [Текст] / М. К. Безродный, М. Н. Голяяд, А. Ю. Рачинський // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №1/8 (67). С. 21-26. (Включено до Index Copernicus, РИНЦ, DRIVER, WorldCat, DOAJ, EBSCO, ResearchBid, American Chemical Society).

У публікації автору належить методика розрахунку площі поверхні крапель розпиленої води.

4. Безродный М. К. Масовіддача при утилізації теплоти парогазової суміші в контактному апараті газокрапельного типу [Текст] / М. К. Безродный, А. Ю. Ра-

чинський, М. Н. Голяд // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві науково-технічний збірник. – 2015. – №2. С. 43-51. (Включено до РИНЦ).

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення середніх коефіцієнтів масовіддачі.

5. Безродный М. К. Экспериментальное исследование коэффициентов тепло- и массообмена при утилизации теплоты парогазового потока в факеле капель механической форсунки [Текст] / М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, Н. Н. Голяд, П. А. Барабаш // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №6/8 (78). С. 50-59. (Включено до Index Copernicus, РИНЦ, DRIVER, WorldCat, DOAJ, EBSCO, ResearchBid, American Chemical Society, Scopus).

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних даних.

6. Безродный М. К., Рачинский А.Ю. Конвективна тепловіддача при утилізації теплоти парогазової суміші в контактному апараті газокрапельного типу. – Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв. – 2015. – №5 (461). С. 54-61.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення середніх коефіцієнтів конвективної тепловіддачі.

7. Безродный М. К. Методика теплового расчета контактного газокрапельного утилизатора теплоты низкотемпературных отходящих газов [Текст] / М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, Н. Н. Голяд // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – №9(1181). С. 128-135. (Включено до Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), Google Scholar, Index Copernicus).

У публікації автору належить розроблення методики крапельного контактного апарату.

8. Безродный М. К. Параметрические границы эффективного использования центробежной водяной форсунки в контактных утилизаторах теплоты отходящих газов [Текст] / М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, Н. Н. Голяд, П. А. Барабаш // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т.89. – №4. С. 868-875. (Иноземне видання).

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення параметричних границь роботи відцентрової форсунки.

9. Патент України на корисну модель №72730. Нагрівник текучої рідини / Безродний М. К., Барабаш П. О., Голяд М. Н., Рачинський А. Ю. опубл. 27.08.2012. Бюл. №16.

Автор розробив конструкцію нагрівача текучої рідини.

10. Патент України на корисну модель №72725. Нагрівник текучої рідини / Безродний М. К., Барабаш П. О., Голяд М. Н., Голубев О. Б. Рачинський А. Ю. опубл. 27.08.2012. Бюл. №16.

Автор розробив конструкцію нагрівача текучої рідини.

11. Патент України на корисну модель №75095. Апарат повітряного охолодження / Безродний М. К., Барабаш П. О., Голяд М. Н., Трокоз Я. Є. Рачинський А. Ю. опубл. 26.11.2012. Бюл. №22.

Автор розробив конструкцію апарата повітряного охолодження.

12. Патент України на корисну модель №78507. Контактний теплоутилізатор / Безродний М. К., Барабаш П. О., Голіяд М. Н., Голубєв О. Б. Рачинський А. Ю. опубл. 25.03.2013. Бюл. №6.

Автор розробив конструкцію контактного теплоутилізатора.

13. Рачинський А. Ю. Інтенсифікація теплопередачі в АПО шляхом використання повітряно-випаровувального охолодження [Текст] / А. Ю. Рачинський, М. К. Безродний, М. Н. Голіяд // X Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 17-20 квітня 2012. – Київ, Україна. – С.149.

У публікації автору належить порівняння їх і визначення найбільш ефективних з них.

14. Рачинський А. Ю. Гідродинаміка і тепломасообмін в контактних апаратах крапельного типу [Текст] / А. Ю. Рачинський, М. К. Безродний // XI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 16-19 квітня 2013. – Київ, Україна. – С. 109.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень з гідродинаміки та тепломасообміну.

15. Рачинський А. Ю. Характеристики розпилювання відцентрових форсунок для контактних утилізаторів теплоти крапельного типу [Текст] / А. Ю. Рачинський, М. К. Безродний, П. О. Барабаш // XII Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 22-25 квітня 2014. – Київ, Україна. – С. 116.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних даних.

16. Рачинський А. Ю. Величина дійсної поверхні тепломасообміну в контактних теплоутилізаторах крапельного типу [Текст] / А. Ю. Рачинський, М. К. Безродний, М. Н. Голіяд // XII Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 22-25 квітня 2014. – Київ, Україна. – С. 117.

У публікації автору належить методика розрахунку площі поверхні крапель розпиленої води.

17. Безродний М. К. Конвективна тепловіддача при утилізації теплоти парогазової суміші в контактному апараті газокрапельного типу [Текст] / М. К. Безродний, А. Ю. Рачинський // III Міжнародна науково-технічна конференція «Холод в енергетиці і на транспорті» 24–25 вересня 2015. – Миколаїв, Україна. – 10с.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення середніх коефіцієнтів конвективної тепловіддачі.

18. Безродний М. К. Граничні умови ефективного використання розпилюючої форсунки в газокрапельних контактних утилізаторах теплоти відхідних газів [Текст] / М. К. Безродний, А. Ю. Рачинський // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» 24-27 вересня 2015. – Миколаїв, Україна. – 3с.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення параметричних границь роботи відцентрової форсунки.

19. Рачинський А. Ю. Гранична температура нагріву води при розпиленні від-

центровими форсунками [Текст] / А. Ю. Рачинский, М. К. Безродний // XIII Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 21-24 квітня 2015. – Київ, Україна. – С. 129.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та визначення граничної температури нагріву води.

20. Рачинський А. Ю. Тепло- і масообмін при утилізації теплоти парогазової суміші в контактному апараті газокрапельного типу [Текст] / А. Ю. Рачинский, М. К. Безродний // IX Міжнародна конференція «Проблеми промислової тепло-техники» 20-23 жовтня 2015. – Київ, Україна. – С. 34-35.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних даних.

21. Рачинський А. Ю. Тепло- і масообмін в контактних апаратах крапельного типу [Текст] / А. Ю. Рачинский, М. К. Безродний // XIV Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» 18-21 квітня 2016. – Київ, Україна. – С. 156.

У публікації автору належить проведення експериментальних досліджень та узагальнення експериментальних даних.

АНОТАЦІЯ

Рачинський А. Ю. Гідродинаміка і тепломасообмін в контактному утилізаторі теплоти газокрапельного типу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

Роботу присвячено експериментальним дослідженням, що направлені на підвищення ефективності роботи контактних тепломасообмінних апаратів шляхом збільшення міжфазної поверхні тепломасообміну при розпиленні рідини відцентровими форсунками, впровадження яких приводить до суттєвої економії матеріальних та енергетичних ресурсів.

Виконано комплексні експериментальні дослідження характеристик факелу розпилення рідини (густини зрошення, кута розкриття факела форсунки, середнього об'ємно-поверхневого діаметра крапель рідини). Встановлено вплив вхідних параметрів на відповідні характеристики та визначено площу поверхні крапель розпиленої рідини.

Експериментально встановлено значення граничної температури нагріву води та її залежність від початкового паровмісту, при якій вода нагрівається до граничної температури в залежності від початкового паровмісту й витрати сухого повітря. Визначено параметричні границі ефективного використання відцентрової механічної форсунки без випаровування крапель нагрітої рідини.

Експериментально досліджено інтенсивність тепло- і масообміну в контактному апараті газокрапельного типу з відцентровою форсункою в умовах утилізації теплоти відхідних газів енергетичних агрегатів. Вперше отримано емпіричні залеж-

ності для розрахунку середніх коефіцієнтів тепловіддачі та масовіддачі, які відносяться до дійсної поверхні крапель розпиленої води. Встановлено особливості процесів переносу в газокрапельній системі та отримано узагальнювальні залежності для процесів тепло- і масовіддачі.

На основі експериментальних досліджень характеристик розпилю та процесів тепломасообміну при конденсації пари з парогазової суміші на краплях розпиленої рідини розроблено методику розрахунку крапельного контактного утилізаційного апарату.

Ключові слова: відцентрова форсунка, парогазова суміш, об'ємно-поверхневий діаметр крапель, об'ємна доля водяної пари, контактний тепломасообмін.

АННОТАЦИЯ

Рачинский А. Ю. Гидродинамика и тепломассообмен в контактном утилизаторе теплоты газокрапельного типа. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена исследованиям, направленным на повышение эффективности работы контактных аппаратов путем увеличения межфазной поверхности теплообмена путем распыления жидкости, внедрение которых приводит к существенной экономии материальных и энергетических ресурсов.

Работа содержит результаты экспериментальных исследований характеристик распыла и процессов тепломассоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на каплях распыленной жидкости.

Исследовано влияние температуры и давления воды на тонкость распыла (величину среднего объемно-поверхностного диаметра капель) для центробежной форсунки в параметрических условиях ее работы и применительно к условиям работы контактного утилизатора теплоты отходящих газов. На основании проведенных опытов получены новые зависимости величины среднего объемно-поверхностного диаметра капель для параметров распыливания жидкости с помощью центробежной форсунки в новом диапазоне изменения избыточного давления и температуры воды перед форсункой.

В результате теоретического анализа движения капель жидкости в факеле распыления центробежной форсунки и использования экспериментальных данных по средним объемно-поверхностным диаметрам капель предложена методика определения действительной межфазной поверхности процессов тепломассообмена в контактных газожидкостных аппаратах капельного типа.

Экспериментально определена зависимость граничной температуры нагрева воды в контактном аппарате газокрапельного типа с центробежной форсункой применительно к условиям утилизации теплоты отходящих газов энергетических агрегатов. Исследования проведены в диапазоне избыточных давлений воды перед форсункой (0,2–0,6) МПа и объемной доли водяных паров парогазовой смеси на входе в аппарат от 0,02 до 0,45. Показано использование полученной зависимости для рас-

чета предельных значений параметров парогазового потока, ограничивающих область эффективной работы контактного аппарата с конденсацией пара и отсутствием режима испарения капель нагретой жидкости.

Экспериментально определена интенсивность тепло- и массоотдачи в контактном аппарате газок капельного типа с центробежной форсункой в условиях утилизации теплоты отходящих газов энергетических агрегатов. Исследования проведены в диапазоне избыточного давления воды перед форсункой (0,2 - 0,6) МПа и объемной долей водяного пара парогазовой смеси на входе в аппарат от 0,08 до 0,35. По результатам экспериментальных исследований определены коэффициенты тепло- и массоотдачи, которые были отнесены к реальной поверхности капель. Полученные в работе результаты экспериментальных исследований коэффициентов тепло- и массоотдачи сравнивались с известными литературными данными для одиночной капли. Установлено, что интенсивность теплоотдачи для капель жидкости с парогазовым потоком выше, чем для одиночной капли, а для массоотдачи, ниже. Установлены особенности процессов переноса в газок капельной системе и получены обобщающие зависимости для процессов тепло- и массообмена для факела капель конуса распыла.

В результате указанного комплекса работ предложена методика теплового расчета контактного газок капельного утилизатора теплоты низкотемпературных отходящих газов при распылении жидкости механической центробежной форсункой, которая учитывает реальные условия протекания процессов переноса в рассматриваемой двухфазной системе. Приведенная процедура теплового расчета утилизационной установки позволяет при заданных параметрах отходящих газов и воды на входе получить тип и количество распылителей для генерирования капель воды, выполнить компоновку в штатном корпусе для отвода газов, рассчитать параметры теплоносителей на выходе с установки и определить ее теплопроизводительность.

Ключевые слова: центробежная форсунка, парогазовая смесь, объемно-поверхностный диаметр капель, объемная доля водяного пара, контактный тепло-массообмен.

ANNOTATION

Rachynskiy A. Ju. Hydrodynamics and heatmass transfer in the contact heat utilizer of gas-droplet type. – The manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.06 – technical thermal physics and industrial heat-power engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kiev, 2017.

Dissertation is devoted to experimental research, aimed at improving the efficiency of contact heat and mass transfer units by increasing the interfacial surface of heat and mass transfer during the liquid spraying by centrifugal nozzles, implementation of which results in significant savings of material and energy resources.

Comprehensive experimental study of the characteristics of the liquid spraying torch (irrigation density, expansion angle of nozzle torch, the average volume-surface diameter of liquid droplets) was done. The influence of input parameters to the relevant properties

was shown and surface area of the sprayed liquid droplets was defined.

The limit temperature of water heating and its dependence on initial vapor content in which water is heated to the limit temperature depending on the initial vapor content and dry air output were experimentally set. The parametric borders of effective use of centrifugal mechanical nozzle without evaporation of heated liquid drops were defined.

Intensity of heat and mass transfer in the contact gas-droplet unit with centrifugal nozzle in terms of heat utilization of energy units' exhaust gases was experimentally researched. The empirical dependences for calculating the average heat transfer and mass transfer coefficients relating to the actual surface of the sprayed liquid droplets are obtained for the first time. The peculiarities of transfer processes in the gas-droplet system were determined and generalized dependence for heat and mass transfer were received.

Based on experimental studies of spraying characteristics and heat and mass transfer processes at vapor condensation from vapor-gas mixture on the sprayed liquid droplets, the method of calculating the droplet contact utilization unit was developed.

Keywords: centrifugal nozzle, vapor-gas mixture, volume-surface diameter of droplets, volume fraction of water vapor, contact heat and mass transfer.