

**МАСОВІДДАЧА ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПАРОГАЗОВІ СУМІШІ
В КОНТАКТНОМУ АПАРАТІ ГАЗОКРАПЕЛЬНОГО ТИПУ**

М. К. Безродний А. Ю. Рачинський М. Н. Голяд

Експериментально визначено інтенсивність масовіддачі в контактному апараті газокрапельного типу з відцентровою форсункою в умовах утилізації теплоти відхідних газів енергетичних агрегатів. Дослідження проведені в діапазоні надлишкового тиску води перед форсункою (0,2 – 0,6) МПа і об'ємною долею водяної пари парогазової суміші на вході в апарат від 0,08 до 0,35. За результатами експериментальних досліджень було визначено коефіцієнти масовіддачі, які були віднесені до реальної поверхні крапель. Отримані результати експериментальних досліджень коефіцієнтів масовіддачі були порівняні з одиночною краплею. Встановлено, що інтенсивність масовіддачі для крапель рідини з парогазовим потоком нижча ніж для одиночної краплі.

Ключові слова: контактний утилізатор, відцентрова форсунка, коефіцієнт масообміну, об'ємна доля водяної пари.

**МАСООТДАЧА ПРИ УТИЛІЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ
В КОНТАКТНОМ АППАРАТЕ ГАЗОКАПЕЛЬНОГО ТИПА**

М. К. Безродный, А. Ю. Рачинский, М. Н. Голяд

Експериментально определена интенсивность масоовиддачи в контактном аппарате газо-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 было определено коэффициенты массоотдачи, которые были отнесены к реальной поверхности капель. Полученные результаты экспериментальных исследований коэффициентов массоотдачи были сравнены с одиночной каплей. Установлено, что интенсивность массоотдачи для капель жидкости с парогазовым потоком ниже чем для одиночной капли.

Ключевые слова: контактный утилизатор, центробежная форсунка, коэффициент массообмена, объемная доля водяного пара.

**AT MASS TRANSFER HEAT RECOVERY STEAM-GAS MIXTURE
THE CONTACTORS GAS DROP TYPE**

M. Bezrodnyi, A. Raczynski, M. Goliyad

The experimentally determined intensity masooviddachi contactor in gas-drip type centrifugal nozzle in a flue gas heat recovery power units. Research conducted in the range of the overpressure nozzle before water (0.2 - 0.6) MPa and a volume fraction of steam vapor mixture entering the apparatus from 0.08 to 0.35. According to the results of experimental research was to determine the coefficient of mass transfer, which were attributed to the real surface of the droplets. The results of experimental studies of mass transfer coefficients were compared with a single drop. The intensity masootdachi for liquid droplets with steam and gas flow is lower than for a single drop.

Keywords: pin recovery, centrifugal nozzle, the mass transfer coefficient, the volume fraction of the water vapor.

Вступ

Однією із важливих проблем при вирішенні задач ефективного використання енергоресурсів є використання теплоти низькотемпературних відхідних газів, як енергетичних так і технологічних агрегатів і пристроїв. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування утилізаційних апаратів контактного типу. Широкого практичного застосування набули

багаточисленні конструкції плівкових контактних апаратів з різними насадками. В літературі також показано, що переваги можуть мати і утилізаційні контактні апарати газокрапельного типу [1].

Генераторами крапель в таких системах найчастіше використовуються відцентрові форсунок, які характеризуються високою ефективністю глибокого розпилення рідини. До переваг даного типу форсунок можна віднести простоту, в порівнянні з іншими подібними пристроями, конструктивну схему, а також наявність широкого літературного матеріалу по дослідженню характеристик таких розпилювачів [2, 3].

Контактні апарати газокрапельного типу в комплексі з тепловими насосами дозволяють не тільки підвищити коефіцієнт корисної дії паливо-спалюючих пристроїв, але і забезпечити глибоке охолодження відхідних газів з метою утилізації прихованої теплоти конденсації, яка міститься в водяних парах, з наступним використанням нагрітої води в якості нижнього джерела теплоти для теплонасосної установки системи теплопостачання різних споживачів [4].

Газокрапельні тепломасообмінні системи з випаровуванням рідини і конденсацією пари на поверхні крапель мають широкий спектр практичного застосування в різних технологічних установках, в тому числі: для випаровування охолоджуючої води (в градирнях) [5], для змішування палива і окислювача (топкові форсунок) [6], для реалізації сушильних процесів (в розпилювальних сушарках) [7], для охолодження і осушення повітря (в кондиціонерах) [8], для зменшення нагрівання повітря при стисненні (в компресорах ГТУ) [9], для нанесення покриття (в нанотехнологіях) [10]. Для газокрапельної двофазної системи в залежності від практичного застосування повинні бути вибрані свої параметричні умови, які будуть забезпечувати найбільш ефективне протікання основного технологічного процесу.

В даній статті поставлена задача експериментального дослідження масообмінних характеристик в системі парогазова суміш – краплі рідини в обмеженому просторі від параметрів даної двофазної системи для вибраного типу розпилювача рідини. В літературі відсутні дані для подібної системи «парогазова суміш – краплі рідини», що визначає актуальність і новизну даного дослідження.

1. Схема експериментальної установки

Важливим кроком при розробці схеми експериментальної установки був вибір розташування форсунок в потоці пароповітряної суміші. Аналіз літературних джерел відомих конструкцій контактних апаратів для утилізації теплоти відхідних газів показав, що в основному застосовуються апарати плівкового типу з протиточною схемою руху газів і рідини, що зумовлено стрімким досягненням максимальної рушійної сили тепломасообмінних процесів. Недоліком апаратів подібного типу є обмеження по продуктивності, пов'язане з явищем «захливання» при швидкості газу 2 – 3 м/с. При використанні газокрапельної системи верхня межа для швидкості газу знаходиться ще нижче (порядку 0,5 – 1,2 м/с) через різке зростання краплинності. При використанні прямоочних схем руху фаз в газокрапельних середовищах практично знімається обмеження по швидкості газового середовища, що дозволяє створювати компактні апарати з інтенсивним протіканням тепломасообмінних процесів [1], а підвищення ступеня утилізації теплоти відхідних газів може бути забезпечено їх ступеневим охолодження шляхом розташування форсунок в декілька ярусів по висоті каналу.

Експериментальні дослідження проводились на експериментальній установці, схема якої наведена на рис. 1. Основними частинами установки є система подачі повітря, пари і води, експериментальна ділянка, система вимірювань.

Парогазова суміш з визначеним паровмістом моделювалася пароповітряною сумішшю, яка готувалася змішуванням потоку повітря, що створював вентилятор і потоку водяної пари, котру отримували в спеціальному парогенераторі і підводили в робочий канал дослідної ділянки через розподільчий пристрій 1. При цьому для забезпечення рівномірного розподілення пароповітряного потоку по перерізу каналу камери змішування 2 нижче розподільчого пристрою для введення пари були встановлені дві перфоровані перегородки 3. Повітря в робочий канал подавалося вентилятором 4, а витрата повітря регулювалася за допомогою регулятора частоти електричної напруги 5 і вимірювалось з використанням трубки Піто-Прандтля 6. Повітря нагрівалося за допомогою електричного нагрівача 7. Регулювання і контроль потужності, яка підводилася до електричного нагрівача здійснювалася за допомогою регулятора напруги типу РНО-250-10 і ватметра типу Д-50162 відповідно.

Водяна пара подавалася в камеру змішування із парогенератора 8. З метою запобігання виносу крапельної вологи із парогенератора в його паровому об'ємі встановлено сепаратор, а на паровій магістралі – пароперегрівник 9. Витрата водяної пари визначалася за потужністю електричних нагрівачів котла за виключенням теплових втрат, визначених експериментально.

В якості розпилювача була вибрана стандартна відцентрова форсунка №26 [3], яка має більш надійну і просту конструктивну схему. Проектна витрата рідини через такий розпилювач (при діаметрі сопла 0,94 мм) може змінюватись в діапазоні від 28,6 до 52,8 кг/год при зміні тиску води перед ним від 6,5 до 24,5 МПа. Для зменшення затрат енергії на розпилення було прийнято рішення про зниження тиску води перед форсункою від 0,6 МПа і нижче. Гідравлічні характеристики форсунки у вказаному діапазоні тисків попередньо були досліджені в роботах [11 – 13].

Вода в контактну камеру 10 підводилась із водопровідної мережі через регулюючий вентиль, водяний фільтр 11, ротаметр 12 і форсунку 13, за допомогою якої розпилювалась на краплі, утворюючи факел розпилу у вигляді конуса 14, контактуючого з охолоджуваною пароповітряною сумішшю. Нагріта вода стікала в камеру збору гарячої води 15 в нижній частині установки.

Для зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище елементи експериментальної установки, які контактували з нагрітим середовищем, покриті тепловою ізоляцією.

Температура води у відповідних точках вимірювалась за допомогою хромель-копелевих термопар 16, попередньо протарованих за допомогою водяного термостата і лабораторних термометрів ТЛ-4.

Температурні параметри парогазової суміші на вході і виході із контактної камери визначалися «сухими» 16 і «мокрими» 17 термопарами. Температурні параметри парогазової суміші по перерізу і по висоті каналу визначалися за допомогою зонду 18. Показання термопар вимірювалось цифровим прибором типу «Овен» і виводилось за допомогою адаптера АС-2 на комп'ютер для реєстрації.

Прямі вимірювання температур, наведені в цій роботі, характеризуються достовірним інтервалом, рівним не більше $\pm 2,5\%$ з достовірною вірогідністю 0,9.

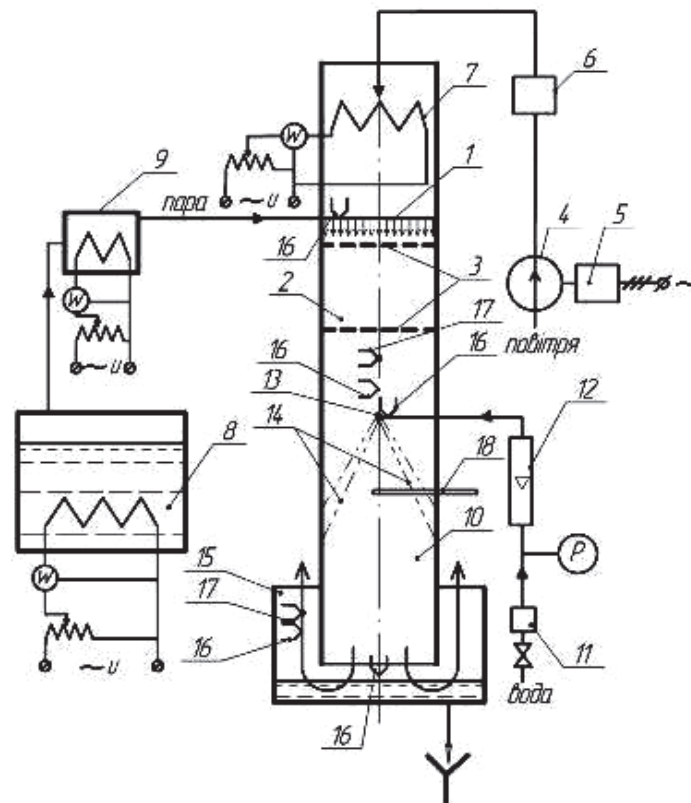


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки:

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

Перед початком основних вимірювань проводилось тестування термовологодатчиків. Для цього в робочу ділянку подавався потік зовнішнього повітря без нагріву і проводилось вимірювання температур потоку по «сухій» і «мокрій» термопарі на вході і на виході із контактної камери 10. Результати вимірювань порівнювались на ідентичність показань між собою, а також з показаннями «сухого» і «мокрого» ртутних термометрів, встановлених в місцях відбору повітря вентилятором.

Дослідження коефіцієнтів масовіддачі проводились в умовах охолодження пароповітряної суміші краплями води, які генерувалися за допомогою форсунки, при фіксованих значеннях тиску води перед форсункою і витрати повітря при зміні витрати пари, що забезпечувало задане значення об'ємної долі водяних парів в парогазовій суміші на вході в робочий канал. Надлишковий тиск води перед форсункою змінювався в діапазоні $P = 0,2-0,6$ МПа, а її температура знаходилась на рівні $15-22$ °С. Ці режимні параметри форсунки відповідають стандартному режиму роботи централізованої водопровідної мережі, що дозволяє уникнути, в більшості випадків, застосування насосу в контактному утилізаторі крапельного типу. Початкова температура пароповітряної суміші задавалась на рівні 105 °С, витрата сухого повітря змінювалась від $19,5$ до $45,9$ м³/год, а об'ємна доля водяної пари ϵ (відношення об'ємної витрати пари до об'ємної витрати суміші) на вході в установку змінювалось від $0,08$ до $0,35$, що відповідає можливому значенню цього показника не тільки для димових газів котлів, але і відхідних газів газотурбінних установок.

Схема відносного руху теплоносіїв в робочому каналі наведена на рис. 2. Вимірювання температур здійснювалось за допомогою зонду 18, який встановлювався на різних висотах h від зрізу сопла форсунки і міг переміщуватися в горизонтальній площині по радіусу r , це давало змогу отримувати розподіл температур як по висоті, так і по поперечному перерізу робочої ділянки каналу. При цьому фіксувалися значення температур за «сухою» і «мокрою» термопарами, аналіз яких дозволив визначити характерні параметри парогазової суміші і крапель води для подальшого розрахунку коефіцієнтів масообміну.

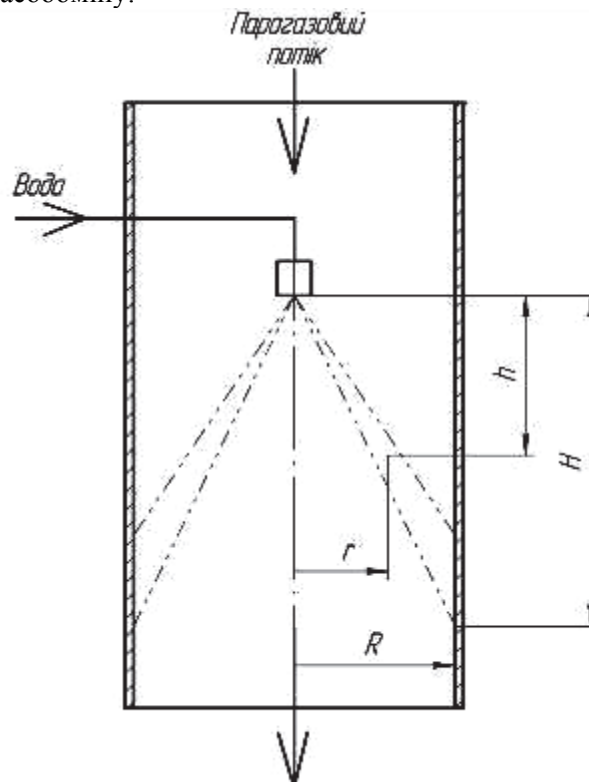


Рисунок 2 – Схема організації руху теплоносіїв в робочому каналі

Систематична похибка вимірювань, визначалася класом точності приладів і складала: при вимірюванні температури від $0,1$ до $1,67$ %; для манометра при визначенні надлишкового тиску води перед форсункою $0,4$ %; для ротаметра при вимірюванні витрати води $0,6$ %; для мікроманометра при вимірюванні витрати повітря за допомогою трубки Піто-Прандтля 1 %; для ваттметрів $0,5$ %.

2. Результати експериментальних досліджень і їх аналіз

На рис. 3 приведена експериментальна залежність розподілу температур крапель води вздовж перерізу каналу на різних висотах: від зрізу сопла форсунки до заданого значення h . Експерименти проводились при надлишковому тиску води перед форсункою 0,6 МПа, $V=19,5 \text{ м}^3/\text{год}$ і об'ємній долі водяних парів $\varepsilon=0,1; 0,2; 0,3$.

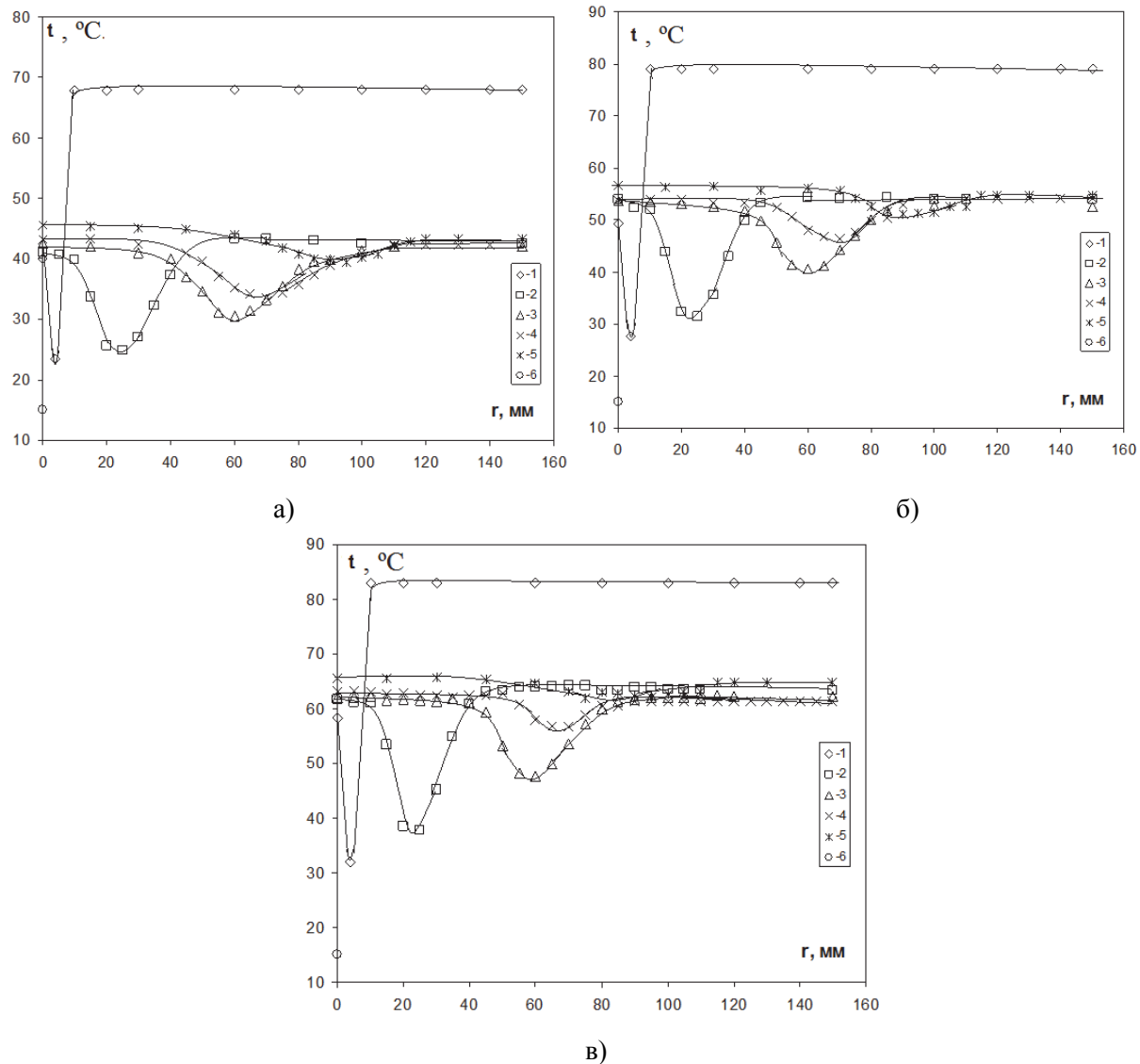


Рисунок 3 – Розподіл температур по перерізу каналу для $P=0,6 \text{ МПа}$, $V=19,5 \text{ м}^3/\text{год}$ при різних об'ємних долях пари в суміші (а - $\varepsilon=0,1$; б - $\varepsilon=0,2$; в - $\varepsilon=0,3$) на різних висотах від зрізу сопла форсунки: 1 – $h=11 \text{ мм}$; 2 – 40 мм ; 3 – 90 мм ; 4 – 110 мм ; 5 – 190 мм ; 6 – температура води перед соплом форсунки ($h=0$)

Аналіз даних на рис. 3 свідчить про те, що температурні криві в точках перетину поверхні конуса факелу розпилу з площиною поперечного перерізу каналу на різних висотах мають мінімум. Цей мінімум температури і відповідає температурі крапель води на поверхні конуса розпилу у відповідних точках. В подальшому (при розрахунках коефіцієнтів переносу) ці значення температур були прийняті за температуру води на виході з відповідної ділянки робочого каналу в залежності від висоти h . Температура парогазової суміші при заданій висоті h визначалась інтегруванням відповідних температурних кривих по перерізу каналу на кожній висоті. Таким чином, були отримані профілі температур парогазової суміші і води по висоті робочого каналу, представлені на рис. 4.

Видно, що охолодження парогазової суміші проходить досить інтенсивно і відбувається на короткій ділянці по висоті робочого каналу. Цьому сприяє висока відносна швидкість руху крапель і розвинена поверхня теплообміну, що визначається загальною поверхнею крапель в факелі їх розпилювання.

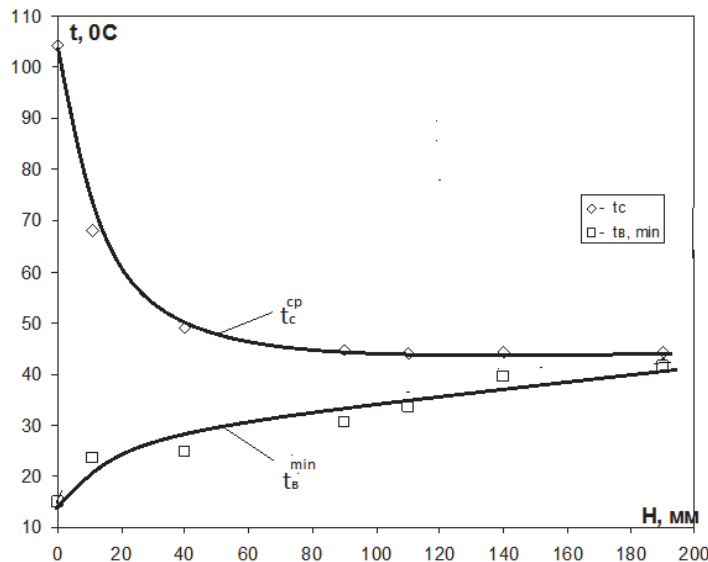


Рисунок 4 – Розподілення середньої температури парогазової суміші і крапель води по висоті каналу при $P=0,6$ МПа, $V=19,5$ м³/год і $\varepsilon=0,1$

Середній коефіцієнт масовіддачі на кожній з ділянок довжини пробігу крапель, яка відповідала заданій висоті камери, визначався за співвідношенням:

$$\beta = \frac{\beta_p RT}{\mu_{H_2O}}, \quad (1)$$

де β_p , R , T , μ_{H_2O} – відповідно коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні крапель води і в об’ємі парогазової суміші, універсальна газова постійна, середня абсолютна температура суміші, молекулярна вага пари.

Коефіцієнт масовіддачі β_p визначався як

$$\beta_p = \frac{j_n}{P_{ПО} - P_{ПВ}}, \quad (2)$$

де $P_{ПО}$, $P_{ПВ}$ – відповідно середньоарифметичний парціальний тиск пари в суміші, середньоарифметичний парціальний тиск пари на поверхні крапель води;

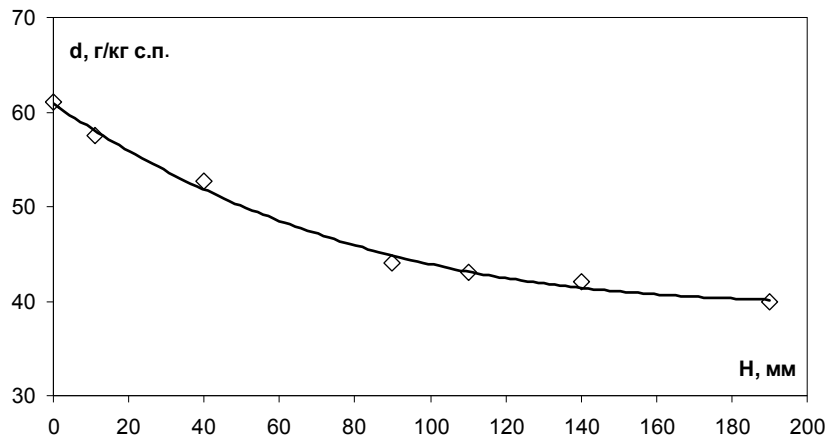
j_n - щільність потоку маси, яка дорівнює:

$$j_n = \frac{(d_1 - d_2)V\rho}{F_\kappa}, \quad (3)$$

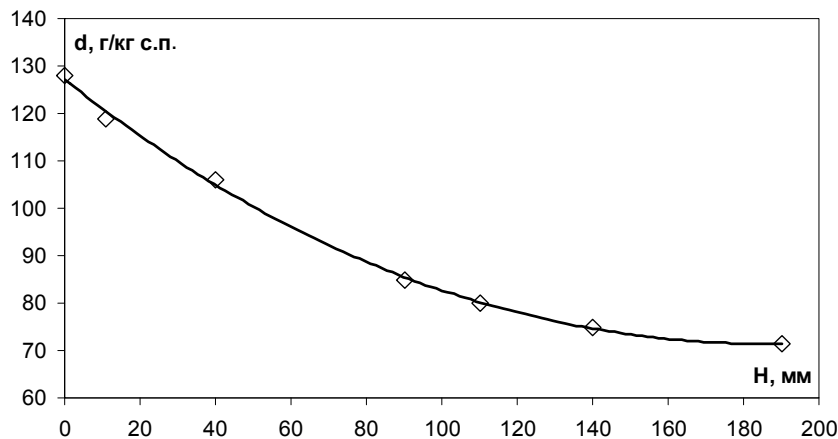
де d_1 , d_2 , V , ρ , F_κ – відповідно вологовміст на вході та виході з дослідної ділянки, витрата сухого повітря, густина сухого повітря, площа крапель води.

Для визначення вологовмісту d_2 на виході з ділянки по висоті камери були використані показання «мокрих» термопар, які осереднювалися по його перерізу. Профілі середнього вологовмісту парогазового потоку по висоті камери представлені на рис. 5.

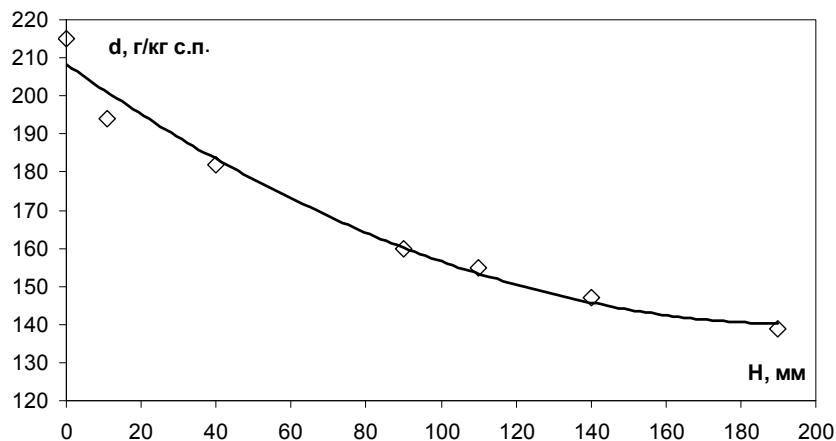
На основі отриманих профілів температур і вологовмісту за вищенаведеною методикою були розраховані середні коефіцієнти масовіддачі на ділянках каналу від нуля до заданої висоти. Результати розрахунків у вигляді розподілу коефіцієнтів масообміну в залежності від довжини шляху пробігу крапель (що змінюється зі зміною висоти каналу) і швидкості руху капель на виході з відповідної ділянки наведені на рис. 6. При цьому швидкість руху крапель визначалась на основі роботи [13].



а)



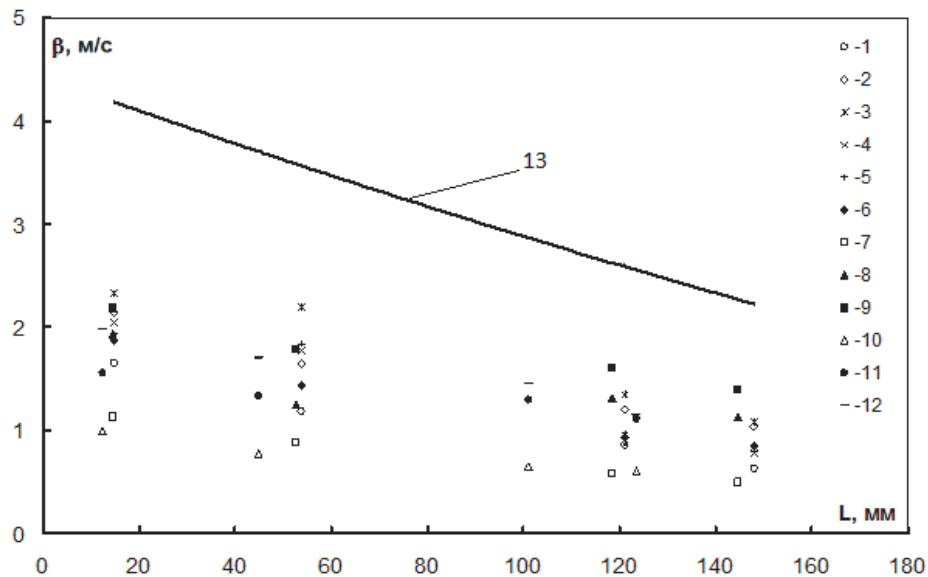
б)



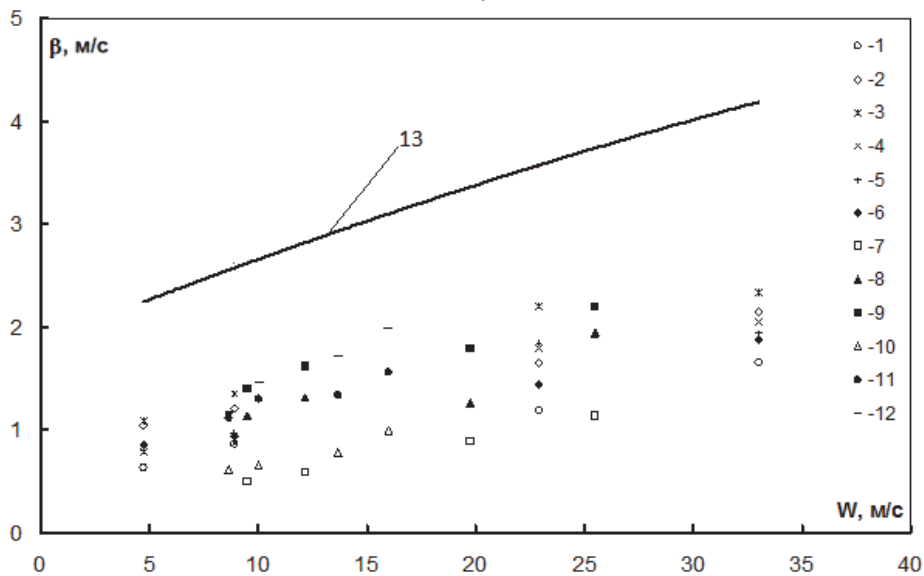
в)

Рисунок 5 – Розподіл середнього вологовмісту по поперечному перерізу камери в залежності від висоти від зрізу сопла форсунки при $P=0,6\text{МПа}$ і $V=19,5\text{ м}^3/\text{год}$: а) $\epsilon=0,1$; б) $\epsilon=0,2$; в) $\epsilon=0,3$

З рис. 6 видно, що коефіцієнти масовіддачі зменшуються зі збільшенням шляху пробігу L , що відбувається внаслідок зменшення швидкості крапель при їх гальмуванні в парогазовому середовищі. Видно також, що збільшення об'ємної долі пари приводить до підвищення інтенсивності масовіддачі. Співставлення отриманих результатів з відповідною залежністю для одиночної краплі свідчить про те, що взаємний вплив сусідніх крапель приводить до додаткового відтоку маси і зменшенню градієнта концентрації пари в приграничному шарі, що в свою чергу проявляється у зменшенні коефіцієнтів масовіддачі.



а)



б)

Рисунок 6 – Середні коефіцієнти масовіддачі від парогазової суміші до факелу крапель в залежності від довжини шляху пробігу крапель (а) і від швидкості руху крапель на виході з відповідної ділянки (б): 1 – $P=0,6$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,1$; 2 – $P=0,6$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,2$; 3 – $P=0,6$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,3$; 4 – $P=0,6$ МПа; $V=20,08$ м³/год; $\epsilon=0,15$; 5 – $P=0,6$ МПа; $V=26,9$ м³/год; $\epsilon=0,15$; 6 – $P=0,6$ МПа; $V=45,9$ м³/год; $\epsilon=0,15$; 7 – $P=0,4$ МПа; $V=19,7$ м³/год; $\epsilon=0,08$; 8 – $P=0,4$ МПа; $V=19,7$ м³/год; $\epsilon=0,18$; 9 – $P=0,4$ МПа; $V=19,7$ м³/год; $\epsilon=0,25$; 10 – $P=0,2$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,12$; 11 – $P=0,2$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,22$; 12 – $P=0,2$ МПа; $V=19,5$ м³/год; $\epsilon=0,35$; 13 – залежність для одиночної краплі за даними роботи [14].

Висновки

- Вперше проведено експериментальне дослідження масовіддачі в газокрапельній системі при віднесенні коефіцієнтів масовіддачі до реальної поверхні взаємодії фаз.
- Показано, що інтенсивність масовіддачі між парогазовим потоком і факелом розпилу крапель нижча її інтенсивності для випадку одиночної краплі, що пояснюється впливом сусідніх крапель потоку в напрямку зменшення градієнта концентрації пари в пограничному шарі кожної з крапель.
- Після узагальнення дослідних даних вони будуть використані при розробці методики розрахунку високоефективних контактних утилізаторів теплоти парогазових сумішей газокрапельного типу.

Використана література

1. Галустов В. С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984.
3. Хавкин Ю. И. Центробежные форсунки. Л.: Машиностроение, 1976.
4. Жовмір М. М. Утилізація низькотемпературної теплоти продуктів згорання палив за допомогою теплових насосів. Промышленная Теплотехника. – 2008. – Т. 30, №2. – С. 90-98.
5. Бринь А. А., Петручик А. И. Тепловой расчет эжекционной градирни и способ повышения ее эффективности. ИФЖ. 2011. Т. 84, № 2. С. 270-273.
6. Дятлов И. Н. Распыливание топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Тр. КАИ им. А. Н. Туполева. Казань. – 1980. – Вып. 4. – С. 4-15.
7. Лыков М. В., Леончик Б. И. Распылительные сушилки. М.: Машиностроение, 1966.
8. Тарабанов М. Г., Видин Ю. В., Бойков Г. П. Тепло- и массоперенос в камерах орошения кондиционеров с форсунками распыления. Учебное пособие. Красноярск.: Кр.ПИ, 1974.
9. Дикий Н. А., Соломаха А. С., Петренко В. Г. Повышение эффективности ГПТУ «Водолей» охлаждением воздушного потока в компрессоре. Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – № 5. – С. 31-34.
10. Fisenko S. P., Brin A. A. Heat and mass transfer and condensation interference in a laminar flow diffusion chamber. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49. Pp.1004 – 1014.
11. Безродный М. К., Голяд Н. Н., Барабаш П. А., Рачинский А. Ю., Голубев А. Б. Некоторые характеристики распыла центробежных форсунок контактных утилизаторов отходящих газов капельного типа. Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 31-38.
12. Безродный М. К., Голяд Н. Н., Барабаш П. А., Рачинский А. Ю., Голубев А. Б. Влияние входных параметров воды на тонкость распыла центробежных форсунок. Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 23-30.
13. Безродный М. К., Голяд М. Н., Рачинський А. Ю. До визначення поверхні тепломасообміну в контактних теплоутилізаторах крапельного типу. Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/8 (67). – С. 21-26.
14. Ranz W., Marschall W. Evaporation from Drops. Part II. – Chem. Eng. Progr., 1952. – V. 48, № 4. P. 173-180.

Безродний Михайло Костянтинович – д-р техн. наук, професор, кафедри теоретичної та промислової теплотехніки. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

Рачинський Артур Юрійович – аспірант кафедри теоретичної та промислової теплотехніки. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

Голяд Микола Никифорович – старший викладач кафедри теоретичної та промислової теплотехніки. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ.

Безродный Михаил Константинович – д-р техн. наук, профессор, профессор теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев.

Рачинский Артур Юрьевич – аспирант кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев.

Голяд Николай Никифорович – старший преподаватель кафедры теоретической и промышленной теплотехники. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев.

Bezrodny M. – Professor, Head of the Chair of Theoretical and Industrial Heating Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Rachinskiy A. – PhD student, Head of the Chair of Theoretical and Industrial Heating Engineering.

Goliyad M. – Senior Lecturer, Head of the Chair of Theoretical and Industrial Heating Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.