

INFLUENCE OF VOLUME WATER CONDENSATION UNDER BOOSTING OF GAS-VAPOR FLOW RATE ON SEPARATION EFFICIENCY IN CONTACT CONDENSERS

ВПЛИВ ОБ'ЄМНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДИ ПРИ ФОРСУВАННІ ШВИДКОСТІ ГАЗОПАРОВОГО ПОТОКУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕПАРАЦІЇ В КОНТАКТНОМУ КОНДЕНСАТОРІ

Oleksandr S. Bortsov
oleksandr.bortsov@nuos.edu.ua
 ORCID: 0000-0003-0458-6064

О. С. Борцов,
 асп.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The conditions for providing the volume water condensation under the boosting of the gas-vapor flow rate in a contact condenser are defined. The processes of the water vapor condensation onto the drops surface and their interaction with the aerosol in the saturated gas-vapor flow are considered. The results of changing of the drop size and its influence on the separation efficiency are obtained using the mathematic simulation. The drops diameter distribution is obtained according to the pressure and rate of the gas-vapor flow. The diameter of the drops which enter with the rate increase from 2 m/s to 4.5 m/s increases from 230 microns to 330 microns at the initial water pressure on the irrigators of 1 bar. Also the drop diameter reduces by 1.7 ... 1.8 times with the increase of the initial water pressure from 1 bar to 9 bar. The presence of the condensation process leads to the increase of the initial drop size by 1.28 times under the conditions of the contact condenser operation along the mist separator elements. The obtained results enable designing the mist separating elements of the contact condensers more accurately.

Keywords: mist separation; contact condenser; separation; condensation; aerosol.

Анотація. Розглянуто процеси дифузійної та молярної взаємодії крапель у насиченому газопаровому потоці. Методом математичного моделювання отримано результати зміни розмірів крапель та їх впливу на ефективність сепарації. У досліджуваному діапазоні діаметра крапель з підвищенням надлишкового тиску води в розпилювачі від 100 до 900 кПа встановлено зменшення діаметрів крапель в 1,7...1,8 разу при швидкостях газопарового потоку від 2 до 4,5 м/с. Наявність процесу конденсації сприяє збільшенню розміру крапель в умовах роботи контактного конденсатора вздовж елементів вологовідділювача до 1,3 разу.

Ключові слова: краплевловлювання; контактний конденсатор; сепарація; конденсація; аерозоль.

Аннотация. Рассмотрены процессы диффузионного и молярного взаимодействия капель в насыщенном газопаровом потоке. Методом математического моделирования получены результаты изменения размеров капель и их влияния на эффективность сепарации. В исследуемом диапазоне диаметра капель с повышением избыточного давления воды в распылителе от 100 до 900 кПа установлено уменьшение диаметра капель в 1,7...1,8 раза при скоростях газопарового потока от 2 до 4,5 м/с. Наличие процесса конденсации способствует увеличению размера капель в условиях работы контактного конденсатора вдоль элементов влагоотделителя до 1,3 раза.

Ключевые слова: каплеулавливание; контактный конденсатор; сепарация; конденсация; аерозоль.

REFERENCES

- [1] Basok B.I., Ryzhkov S.S., Bortsov O.S. Doslidzhennia poperednoi stupeni separatora bahatofaznykh sumishei palyv pidvyshchenoho tysku u mezhakh vnutrishnoi zadachi [Study of the preliminary stage of the separator of the multiphase mixtures of the high pressure fuels within the inner problem]. *Industrial Heat Engineering – Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013.
- [2] Kolomieiev V., Ksendziuk M., Romanov V.I., Movchan S.M., Kuznetsova S., Dykyi M. HPU-16K: doslidno-promyslova ekspluatatsiia, mizhvidomchi pryimalni vyprobuvannia, perspektyvy vykorystannia [GPU-16K: pilot operation, interdepartmental acceptance tests, prospects of utilization]. *Naftova i hazova promyslovist – Oil and gas industry*, no. 4, issue 228.
- [3] Kuznetsova S.A., Movchan S.N., Solomonyuk D.N., Ryzhkov S.S., Chobenko V.N., Shevtsov A.P. Kontaktnaya gazoparoturbinnaya ustanovka dlya morskogo obyektu [Contact gas steam turbine plant for the marine facility].

Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Suchasnyi stan ta problemy dvyhunobuduvannia» [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Current status and problems of engine construction»]. Mykolaiv, 2012.

- [4] Kucherenko O., Movchan S., Romanov V., Chobenko V., Kuznetsova S. Kontaktnye gazoparoturbinnye ustanovki «Vodoley» – sostoyanie i perspektivy [Contact gas vapor turbine power units «Vodoley»: state and prospects]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni* [Current technologies in engineering], 2008, issue 2.
- [5] Isakov B., Movchan S., Bochkarev Yu., Kuznetsova S., Kolomieiev V., Izbash V., Ksendziuk M. Kontaktnyi kondensator ustanovky HPU-16K [Contact condenser of the GPU-16K unit]. *Naftova i hazova promyslovist – Oil and gas industry*, 2012, no. 5, issue 223.
- [6] Bondin Yu., Krivutsa V., Movchan S., Romanov V., Kolomeev V. Opyt ekspluatatsii gazoturbinnoy ustanovki GPU-16K s energeticheskim vpryskom para [Operating experience of the GPU-16K gas-turbine power unit with the energy vapor injection]. *Gazoturbinnye tekhnologii – Gas Turbo Technology*, 2004, no. 5, issue 32.
- [7] Izbash V.I., Kucheluk N., Movchan S.N., Filonenko A., Kuznetsova S.A. Opyt ekspluatatsii i puti sovershenstvovaniya gazoperekachivayushchey ustanovki GPU-16K i ee sostavnykh chastey [Operating experience and the ways of improvement of the GPU-16K gas compressor unit and its elements]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 2007, vol. 29, no. 7.
- [8] *Ofitsiyni sait kompanii ANSYS* (ANSYS company official website). Available at: www.ansys.com.
- [9] Ryzhkov A.S. Eksperimentalnye issledovaniya gidrodinamicheskogo koagulyatora maslootdelatelya [Experimental studies of the hydrodynamic coagulator of the oil separator]. *Mater. 4-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Problemy ekologii i energosberezheniya v sudostroenii»* [Proc. Of the 4th Int. Scientific and Practical Conf. «Energy efficiency and environmental issues in shipbuilding»]. Mykolaiv, 2005, pp. 171–172.
- [10] Ryzhkov S.S. *Uzahalnena matematychna model vyznachennia intensyvnosti protsesu ochystky dyspersnykh bahatofaznykh potokiv u systemakh enerhetychnykh ustanovok* [Generic mathematical model of the intensity estimation of the cleaning process of the disperse multiphase flows in the power units systems]. *Sbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of NUOS publication*, 2014, no 3, pp. 69–76.
- [11] Fuks N.A. *Uspekhi mekhaniki aerorozolei. Itogi nauki. Khimicheskie nauki* [Aerosol mechanics progress. Accomplishments of the science. Chemical sciences]. Moscow, AN SSSR Publ., 1961.
- [12] Shevtsov A.P., Bortsov O.S. Vdoskonalennia resursozberezhennia v kontaktnykh hazoparoturbinnnykh ustanovkakh pry obiemnii kondensatsii vody ta forsuvanni shvydkosti hazoparovoho potoku [Resource efficiency improvement in the contact gas vapor turbine power units under the volume water condensation and boosting of the gas-vapor flow rate]. *Mater. IX mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Problemy ekologii ta enerhozberzhennia v sudnobuduvanni»* [Proc. Of the 9th Int. Scientific and Practical Conf. «Energy efficiency and environmental issues in shipbuilding»]. Mykolaiv, 2014, pp. 11.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зниження масогабаритних показників контактного конденсатора з одночасною інтенсифікацією конвективної складової тепломасопереносу можливе при збільшенні швидкості газопарової суміші і питомої щільності зрошення. Таке збільшення обмежене гідродинамічною стійкістю в об'ємі насадки. У разі порушення цієї стійкості охолоджуюча вода, що рухається назустріч газопаровій суміші перед насадкою, в об'ємі насадки рухається в напрямку газопарової суміші. Зовні втрата гідродинамічної стійкості характеризується значними коливаннями опору і зниженням інтенсивності конденсації [3]. Коректне моделювання фізичних процесів в елементах енергетичних установок дозволяє значно знизити витрати на їх розробку, доводку та експлуатацію [6]. Одним із завдань удосконалення контактної газопаротурбінної установки (КГПТУ) є підвищення ефективності утилізації води у контактному конденсаторі при форсуванні швидкості газопарового потоку [5, 6]. Тому уточнення фізичного і математичного моделювання

процесів у контактному конденсаторі є актуальним науковим завданням.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження процесів осадження в контактному конденсаторі КГПТУ представлені в роботах [2, 6, 7]. Газопарова суміш після котла-утилізатора потрапляє у контактний конденсатор, де за допомогою охолоджуючої води, яка розпилюється краплями діаметром 0,1...0,18 мм через форсунки, досягається конденсація водяної пари. Краплі води, що сконденсувались, за рахунок сили тяжіння потрапляють у конденсатор-збірник. Краплі, що не сконденсувались, потрапляють у зону між форсунками та інерційним сепаратором, пролітають її і потрапляють в інерційний сепаратор. Краплі, які не були вловлені в інерційному сепараторі, вилітають у навколишнє середовище [12].

Осадження частинок у сепараторі відбувається за рахунок сил інерції і взаємодії зі стінками при вході робочого середовища у канал сепаратору α .

При утворенні градієнта концентрації робочого середовища та збільшенні швидкості потоку відбувається збільшення сил інерції та осадження на стінках сепаратора [1, 11].

При роботі контактного конденсатора в зоні між форсунками та інерційним сепаратором відбувається конденсація пари води на поверхні крапель і їх взаємодія з аерозолем. Це призводить до збільшення діаметра і маси крапель, що впливає на їх інерційну складову. Для осадження крапель у контактному конденсаторі установки ГПУ-16К використовується хвильовий сепаратор [5]. Удосконалення ефективності хвильового сепаратора сприяє зменшенню викидів крапель у навколишнє середовище та поверненню їх у робочий цикл. На ефективність сепарації впливають розміри крапель, а коректне їх визначення дає змогу збільшити ефективність або зменшити опір у хвильовому сепараторі [2].

У розглянутих джерелах не уточнено об'ємний вплив конденсації пари води на поверхню крапель та їх взаємодія з аерозолем при руху газопарового середовища [2, 6, 7, 11, 12]. Це потребує додаткового дослідження процесів дифузії та молярної взаємодії крапель у насиченому газопаровому потоці в умовах роботи контактного конденсатора.

МЕТОЮ СТАТТІ є отримання залежності впливу збільшення діаметра крапель при конденсації пари води на їх поверхні та взаємодії з аерозолем на ефективність сепарації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розрахунок інерційного вловлювання крапель проводився при розмірах, що відповідають конструкції вологовідділювача, проточна частина якого складається з чотирьох хвиль (рис. 1).

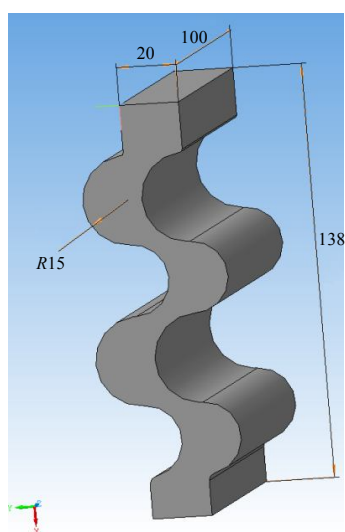


Рис. 1. Проточна частина вологовідділювача

Для дослідження осадження крапель використовувався метод математичного моделювання на базі

сучасного програмного забезпечення пакета прикладних програм типу ANSYS [8] (збіг результатів розрахунку та експерименту при сепарації 90...95 % [9]). Побудова розрахункової сітки була виконана у пакетному модулі ANSYS Workbench без спрощення конструкцій. Відповідно до конструктивних особливостей сепараторів (рис. 2,а) у 3D-системі координат побудована розрахункова сітка (див. рис. 2,б) з трикутних сегментів, об'єм яких не перевищує $S = 25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$. Загальна кількість об'ємних трикутних сегментів складає 120 тис.

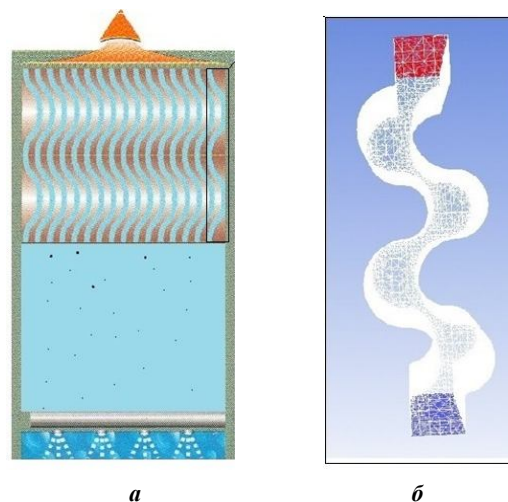


Рис. 2. Конструкція вологовідділювача: а – загальний вигляд; б – розрахункова сітка каналу вологовідділювача

Фізична модель об'ємної конденсації води. При переміщенні крапель у зоні зрошення на їх поверхні конденсується пара за рахунок різниці густини пари в потоці і на поверхні крапель, а також здійснюється осадження більш дрібних крапель.

При вході газопарової суміші у сепаратор використовується дифузіофоретична сила для осадження крапель на стінці. Далі краплі з потоку осаджуються внаслідок різкого розвороту потоку на $45 \dots 90^\circ$ завдяки силі Саффмана. Далі за рахунок утворення градієнта концентрації робочого середовища та збільшення швидкості потоку застосовується дифузіофоретична сила, що сприяє осадженню частинок при проходженні звуженої частини сепаратора.

Математична модель об'ємної конденсації води. Для дослідження збільшення маси краплі за рахунок конденсації використовувались наступні залежності [11].

Дифузійний перенос маси пари представлений залежностями:

$$\text{Sh} = c \cdot \sqrt{\frac{\beta \cdot d_k}{D}}, \quad (1)$$

де c – поправний коефіцієнт (по Левічу – 1,0; по Фрідленду – 0,89; по Акселоруду – 1,07); β – коефіцієнт масовіддачі; d_k – діаметр краплі; D – коефіцієнт дифузії пари у повітрі;

$$Sh = cPe^{1/2}, \quad (2)$$

де Pe – число Пекле,

$$\beta = \frac{D}{d_k} c \left(\frac{\omega d_k}{D} \right)^{1/2}.$$

де ω – швидкість газопарового потоку.

Із залежностей (1), (2) отримано коефіцієнт масо-віддачі

$$\beta = \frac{D}{d_k} c \left(\frac{\omega d_k}{D} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

З урахуванням (3) швидкість осадження на одиницю площі

$$j = \beta(\rho_{п.к} - \rho_n) \cdot F, \quad (4)$$

де F – площа краплі; $\rho_{п.к}$ – густина на поверхні краплі; ρ_n – густина пари.

Тоді загальна залежність приросту маси краплі Δm при конденсації пари та осадженні аерозолію

$$\Delta m = \pi c(\rho_{п.к} - \rho_n)(D\omega d)^{1/2} \cdot t. \quad (5)$$

Для розрахунку осадження крапель при умовах приросту її маси за виразом (5) у вологовідділювачі використовувалась залежність руху крапель з силами,

що діють на неї. У декартових координатах це рівняння записувалось наступним чином:

$$\frac{\partial u_p}{\partial x_t} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_D. \quad (6)$$

У залежності руху (6) x_t – величина часу; сили на одиницю маси частинки: F_1 – інерції, F_2 – турбофорезу, F_3 – дифузійфоретична, F_4 – підйомна Саффмана та F_D – опору.

Рівняння сил, які діють на частинку, рівняння руху, що враховувало силу інерції частинки, турбофорезу, дифузійфоретичних сил, а також сил Саффмана детально описані в [1, 2].

Для урахування впливу об'ємної конденсації води при форсуванні швидкості газопарового потоку на ефективність сепарації в контактному конденсаторі була розроблена додаткова процедура алгоритмічною мовою програмування Pascal 7.0 [2].

Визначення збільшення розміру крапель за рахунок конденсації пари води на їх поверхні і взаємодії з аерозолем при різних діаметрах крапель. Згідно з результатами розрахунків отримано розподіл тиску та швидкостей у каналі вологовідділювача при початковому вході потоку у досліджуваний елемент 2,0...4,5 м/с (рис. 3).

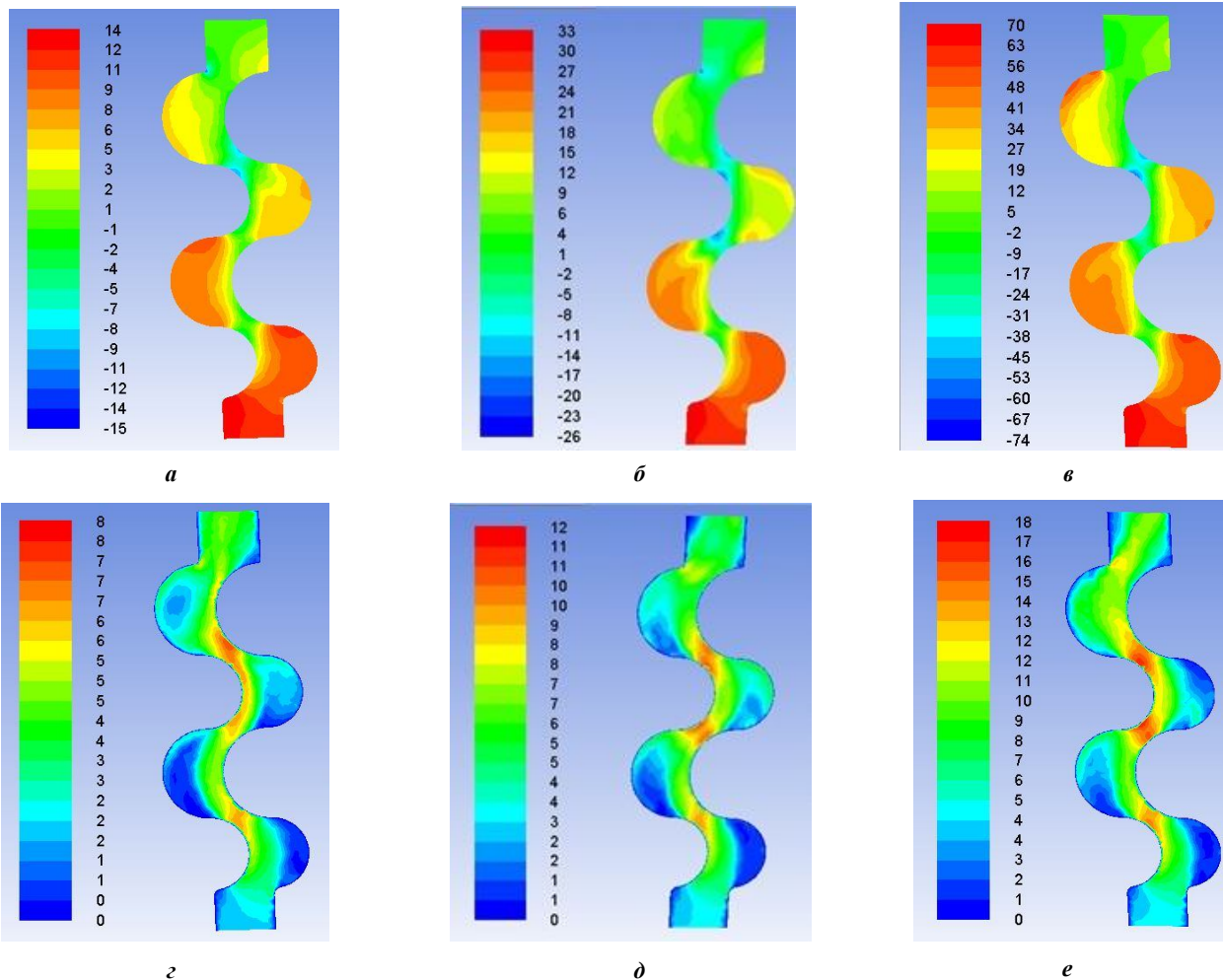


Рис. 3. Розподіл тиску (а–в) та швидкостей (z–e) у каналі вологовідділювача при початковій швидкості: а, z – 2 м/с; б, d – 3 м/с; в, e – 4,5 м/с

Отримані результати свідчать, що у зоні четвертої хвилі вологовідділювача спостерігається зменшення швидкості та появи вихрової зони, завдяки якій краплі з діаметром до 10 мкм осаджуються на стінках за рахунок сил інерції.

При різних початкових тисках вильоту водяної суміші спостерігаємо, що зі збільшенням тиску ді-

аметр крапель зменшується на 41 % при робочому тиску 1 та 9 бар (рис. 4), що у свою чергу впливає на збільшення діаметра крапель залежно від відстані пробігу.

Залежно від відстані, яку пролетіла крапля (0,1...0,4 м) при однаковому тиску розмір краплі може збільшуватись до 25 % (рис. 5).

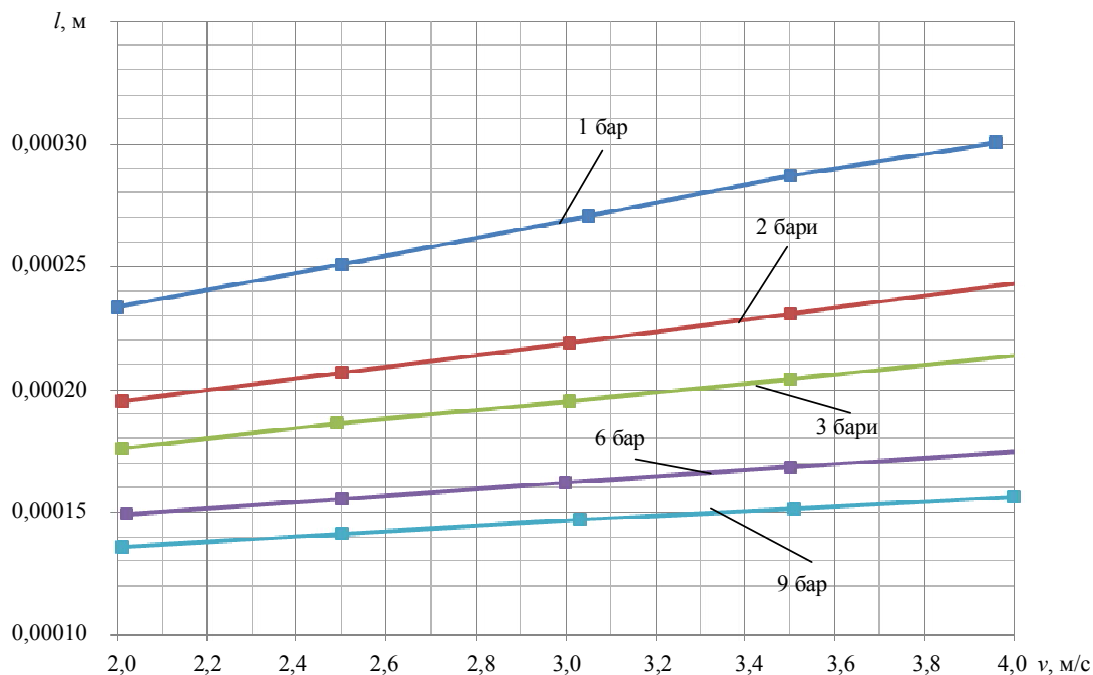


Рис. 4. Залежність діаметрів крапель, що уносяться, від швидкості газопарового потоку і початкового тиску води на зрошувачі

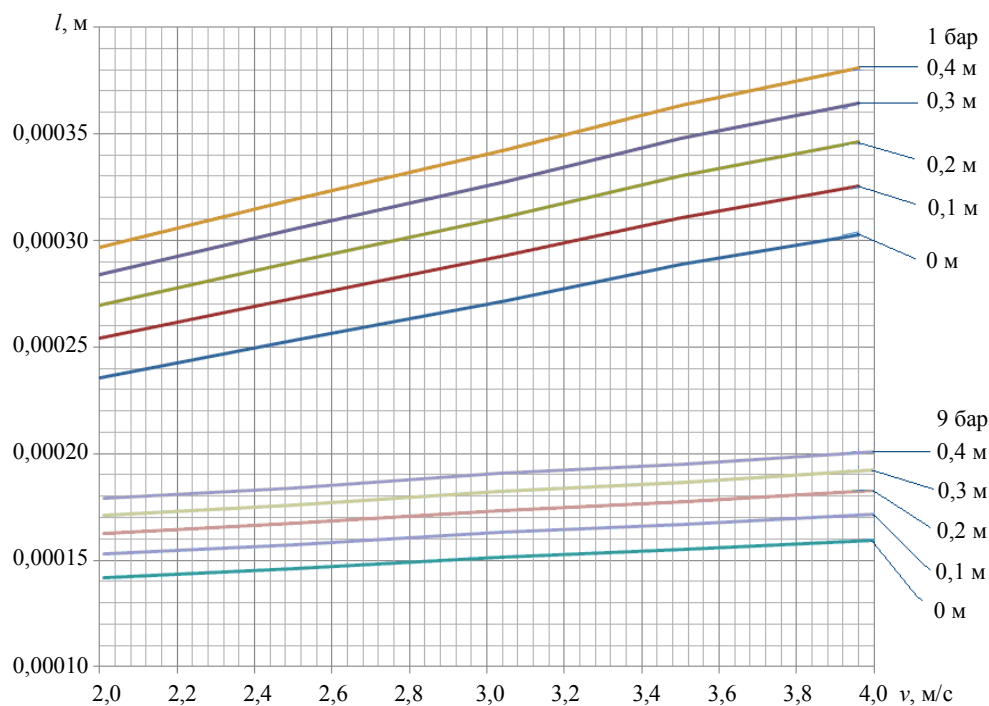


Рис. 5. Збільшення діаметра крапель залежно від відстані пробігу

Визначення ефективності осадження при збільшенні розміру крапель. Збільшення діаметра крапель призводить до підвищення ефективності осадження (рис. 6). Особливо стрімко

збільшується осадження при розмірах крапель від 27 до 50 мкм. Отримані результати дають змогу більш коректно проектувати вологовідділювальні елементи контактних конденсаторів.

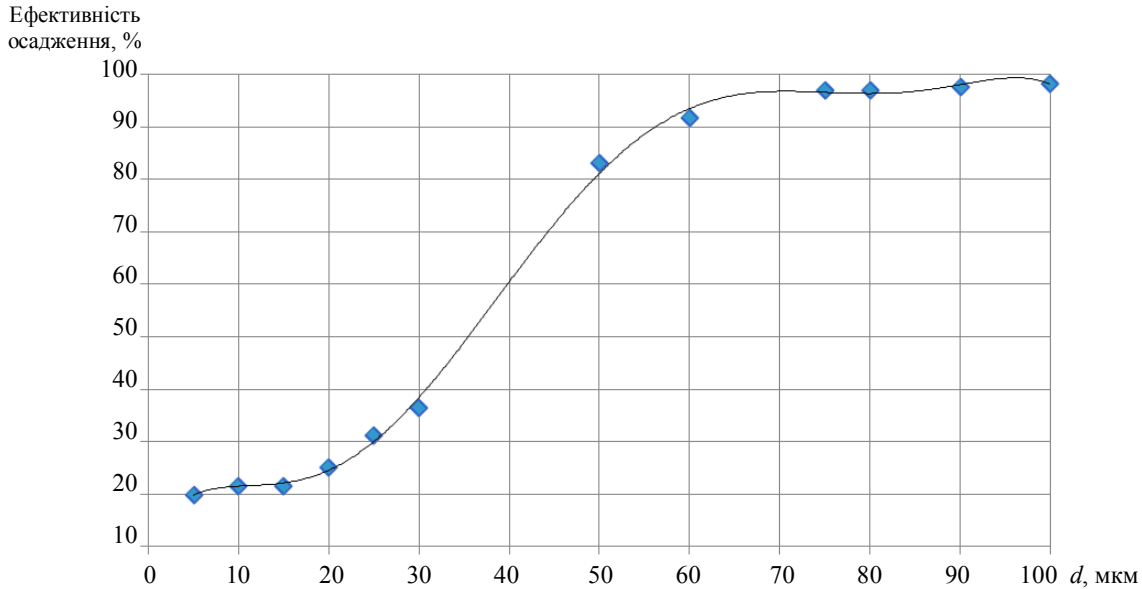


Рис. 6. Ефективність осадження залежно від розміру краплі

ВИСНОВКИ

У результаті роботи отримано залежність впливу об'ємної конденсації води при форсуванні швидкості газопарового потоку на ефективність сепарації в контактних конденсаторах. За допомогою математичного моделювання отримані наступні результати:

1. Діаметр крапель, що уносяться, з підвищенням швидкості від 2 до 4,5 м/с збільшується з 230 до

330 мкм при початковому тиску води на зрошувачі 1 бар.

2. Діаметр крапель, що уносяться, з підвищенням початкового тиску води від 1 до 9 бар знижується в 1,7...1,8 разу.

3. Процес конденсації призводить до збільшення початкового розміру крапель в умовах роботи контактного конденсатора вздовж елементів вологовідділювача до 1,28 разу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Басок, Б. І. Дослідження попередньої ступені сепаратора багатозначних сумішей палив підвищеного тиску у межах внутрішньої задачі [Текст] / Б. І. Басок, С. С. Рижков, О. С. Борцов // Промышленная теплотехника : междунар. науч.-прикл. журнал. – 2013.

[2] ГПУ-16К: дослідно-промислова експлуатація, міжвідомчі приймальні випробування, перспективи використання [Текст] / В. Коломєєв, М. Ксендзюк, В. Романов, С. Мовчан, С. Кузнецова, М. Дикий // Нафтова і газова промисловість : наук.-вироб. журнал. – К. : НАК Нафтогаз України, 2006. – № 4 (228).

[3] Контактная газопаротурбинная установка для морского объекта [Текст] / С. А. Кузнецова, С. Н. Мовчан, Д. Н. Соломонюк, С. С. Рыжков, В. Н. Чобенко, А. П. Шевцов // Сучасний стан та проблеми двигунобудування : матер. Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв, 2012.

[4] Контактные газопаротурбинные установки «Водолей» – состояние и перспективы [Текст] / О. Кучеренко, С. Мовчан, В. Романов, В. Чобенко, С. Кузнецова // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХП», 2008.

[5] Контактний конденсатор установки ГПУ-16К [Текст] / Б. Ісаков, С. Мовчан, Ю. Бочкарев, С. Кузнецова, В. Коломєєв, В. Ізбаш, М. Ксендзюк // Нафтова і газова промисловість. – К., 2005. – № 5 (223).

[6] Опыт эксплуатации газотурбинной установки ГПУ-16К с энергетическим впрыском пара [Текст] / Ю. Бондин, В. Кривуца, С. Мовчан, В. Романов, В. Коломєєв // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 5 (32).

- [7] Опыт эксплуатации и пути совершенствования газоперекачивающей установки ГПУ-16К и ее составных частей [Текст] / В. И. Избаш, Н. Кучерук, С. Н. Мовчан, А. Филоненко, С. А. Кузнецова // Промышленная теплотехника : междунар. научн.-прикл. журнал. – К. : ИТТФ НАНУ, 2007. – Т. 29, № 7.
- [8] Офіційний сайт компанії ANSYS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.ansys.com.
- [9] **Рыжков, А. С.** Экспериментальные исследования гидродинамического коагулятора маслоотделителя [Текст] / А. С. Рыжков // Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении : матер. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Николаев, 2005. – С. 171–172.
- [10] **Рижков, С. С.** Узагальнена математична модель визначення інтенсивності процесу очистки дисперсних багатофазних потоків у системах енергетичних установок [Текст] / С. С. Рижков // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2014. – № 3 (453). – С. 69–76.
- [11] **Фукс, Н. А.** Успехи механики аэрозолей. Итоги науки. Химические науки [Текст] / Н. А. Фукс. – М. : Изд-во АН СССР, 1961.
- [12] **Шевцов, А. П.** Вдосконалення ресурсозбереження в контактних газопаротурбінних установках при об'ємній конденсації води та форсуванні швидкості газопарового потоку [Текст] / А. П. Шевцов, О. С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матер. IX Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв, 2014. – С. 11.

© О. С. Борцов

Надійшла до редколегії 16.09.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *М.І. Радченко*