ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

УДК 666.972 doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛА ВІДХОДЯЩИХ ГАЗІВ

В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, В. Б. БАЙРАЧНИЙ, І. В. ПІТАК, А. О. БАРАНОВА*

кафедра Хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА
**e-mail:* baranovaa647@gmail.com

АНОТАЦІЯ *Корисне використання тепла насамперед пов'язане з використанням тепла відхідних газів. Слід підкреслити, що у всіх випадках необхідно прагнути повернути технологічному процесу максимальну кількість тепла газів, що відходять. Частину тепла зазвичай повертають до робочої камери з підігрітим повітрям (до 300 – 500 ^{0}C). В окремих випадках можливе використання деякої кількості тепла газів для підсушування і нагріву сировини, готового продукту та/або підігріву технологічної води, що надходить на переробку; використання тепла газів для вироблення пари тих чи інших параметрів, для необхідного нагрівання дуття. Все це відкриває можливість досягнення дуже високих кінцевих показників енергетичних установок. Однак, як правило, гази, що відходять, характеризуються досить високими концентраціями дрібнодисперсних твердих частинок (дрібнодисперсні виноси), які необхідно ефективно видалити в сепараторі оскільки в більшості випадків вони перешкоджають ефективному використанню тепла газів, що відходять. Таким чином, ефективна сепарація дрібнодисперсного винесення має вирішальне значення для утилізації тепла газів, що відходять, особливо для високопродуктивних агрегатів. На підставі відомих літературних даних та результатів власних експериментів, розглянуто деякі питання сепарації дрібнодисперсного виносу. Сформульовано основи механізму сепарації, які зводяться до з'ясування причин та закономірностей руху дрібних частинок до сепаруючої поверхні поперек основного потоку. Детально проаналізовано механізми сепарації дрібних частинок за рахунок турбулентної дифузії та оцінено можливість реалізації механізму сепарації на основі термофорезу. Встановлено визначальні параметри та критерії, що характеризують процес сепарації частинок. Виведено формули для оцінки стікання сепарації частинок та проаналізовано вплив визначальних критеріїв на цю величину. В результаті аналізу наведених даних зроблено практичні висновки про шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових умовах.*
Ключові слова: *сепарація дрібних частинок; механізм сепарації; інтенсифікація процесу сепарації*

INVESTIGATION OF THE INTENSIFICATION OF SEPARATION PROCESSES USING THE HEAT OF EXHAUST GASES

V. VYTIAHANETS, V. BAIRACHNYI, I. PITAK, A. BARANOVA

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT *The useful use of heat for the above cases is primarily related to the use of heat from the exhaust gases. It should be stressed that in all cases it is necessary to return the maximum amount of waste heat to the process. Part of the heat is usually returned to the working chamber with heated air (up to 300 - 500 ^{o}C). In some cases, it is possible to use a certain amount of gas heat for drying and heating the raw material, the finished product and/or for heating the process water used in the processing; the use of heat from gases to produce steam and other parameters for the necessary heating of the blast furnace. All of this opens up the possibility of achieving very high end results for energy plants. However, as a rule, the exhaust gases are characterized by fairly high concentrations of fine solid particles (fine removals), which must be effectively removed in the separator because in most cases they prevent the efficient use of heat from the exhaust gases. Thus, efficient separation of fine removal is crucial for heat recovery of exhaust gases, especially for high-performance units. The ways to intensify the separation processes in industrial waste were investigated and made practical conclusions. Based on known literature data and results of own experiments, some questions of separation of fine removal are considered. The basics of the separation mechanism are formulated, which are reduced to elucidating the causes and patterns of movement of small particles to the separating surface across the main stream. The mechanisms of separation of small particles due to turbulent diffusion are analyzed in detail, the possibility of realization of the mechanism of separation on the basis of thermophoresis is estimated. The initial parameters and criteria that characterise the particle separation process have been established. A formula for assessing the particle separation rate is derived and the effect of the specified criteria on this value is analyzed. The analysis of the above dat a resulted in practical conclusions on ways to intensify the separation processes under industrial conditions.*
Keywords: *separation of fine particles; separation mechanism; intensification of the separation process*

Вступ

Високотемпературні вогнетехнічні процеси є виробничою основою таких провідних галузей промисловості, як чорна металургія, важке машинобудування, переробка нафти та газу, виробництво будівельних матеріалів: цементу, скла. Велике значення мають вони при отриманні

© В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, В. Б. БАЙРАЧНИЙ, І. В. ПІТАК, А. О. БАРАНОВА, 2022

мінеральних добрив, наповнювачів у вигляді оксидів та ниткоподібних кристалів різного хімічного складу та структури та звичайно для хімічної промисловості.

Останнім часом високотемпературні виробничі процеси зайняли одне з головних місць у паливному балансі країни. У цьому загальне масове споживання палива цехами і заводах, вищевказаних галузей вимірюється багатьма сотнями і тисячами тон, що значно перевищує теплові потужності сучасних електростанцій. Поряд з цим, коефіцієнт використання тепла палива, яке витрачається на сам виробничий процес, становить, з урахуванням гранично розвиненої регенерації, величину дуже невелику: 15 – 20 % для камерних та ванних печей та 35 – 40 % для великих методичних нагрівальних та найбільш економічних шахтних печей. Ці низькі ККД продуктивних вогнетехнічних процесів невипадкові. Вони термодинамічно неминучі і викликані потрібним високим температурним рівнем процесів. В даному випадку мірою температурного рівня процесу вважається температура, що видається технологічного продукту. Усе це і визначає першу важливу причину необхідності тієї чи іншої комбінування промислової вогнетехніки з енергетикою.

Мета роботи

Метою дослідження є розглянути шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових відходах та зробити практичні висновки.

Виклад основного матеріалу

До особливостей дрібнодисперсних частинок слід розвинену питому поверхню та здатність коагулювати навіть у твердому стані. Такі частки легко йдуть разом із струменем газу і схильні до хаотичного (броунівського) руху.

Вивчення механізму сепарації, зводиться тут, в основному, до з'ясування причин і закономірностей руху дрібних частинок до поверхні, що сепарує, поперек основного газового потоку. На дрібні частинки, у загальному випадку, можуть діяти сили тяжкості, в'язкості, броунівські, радіометричні, електростатичні та інші. Сили тяжкості та інерції тут мізерно малі і, практично не впливають на рух частинок. Тому ними зазвичай нехтують.

Розглянемо механізм сепарації дрібнодисперсних частинок за рахунок турбулентної дифузії. У цьому випадку, в результаті поперечного турбулентного масообміну, концентрація частинок перерізу турбулентного ядра потоку вирівнюється. Основною перешкодою на шляху руху частинок до стінки, що сепарує є прикордонний дифузійний шар.

За гіпотезою Тейлора і Прандтля [1], дифузійний шар $\delta_Д$, збігається з ламінарним прикордонним шаром $\delta_Л$, на межі яких коефіцієнти молекулярної та турбулентної в'язкості рівні. Турбулентні пульсації не проникають всередину ламінарного шару, і частинки рухаються до стіни за рахунок молекулярної дифузії. Згідно з теорією Ландау і Левіга [2], що точніше відображає дійсність, турбулентні пульсації проникають у ламінарний прикордонний шар і загасають лише біля самої поверхні, де є дифузійний підшар, в якому молекулярна дифузія переважає над турбулентною. На межі дифузійного шару збігаються коефіцієнти молекулярної та турбулентної дифузії. Для аерозолів, товщина дифузійного шару значно менша за прикордонний ламінарний шар $\delta_Д/\delta_Л \approx 0{,}57/Sc^{1/4}$, де критерій Шмідта для аерозолів $Sc<<1$.

Можна припустити помітну роль сил інерції у сепарації дрібнодисперсних аерозолів. Незважаючи на повне збільшення частинок діаметром 25 мкм і дрібнішими за турбулентні пульсації, можливо, що поблизу стінки, навіть на вельми дрібнодисперсні частинки (1 – 5) мкм діють значні інерційні сили, які можуть викликати їх сепарацію [3]. На відміну від макроінерційних сил, зумовлених зміною величини та напрямки середньої швидкості при обтіканні тіла, виникнення мікроінерційних сил можливе за рахунок дрібномасштабних перпендикулярних стінок вихорів високої інтенсивності, що спостерігаються на відстані від поверхні порядку декількох мікрон. При зменшенні масштабу пульсацій, їх прискорення збільшується і може бути причиною появи мікроінерційних сил в аерозолях.

Викладені найбільш ймовірні гіпотези про механізм сепарації не мають, доки, достовірного експериментального підтвердження, і тому механізм сепарації мілкодисперсних частинок з турбулентного потоку не цілком зрозумілий.

З огляду на велику складність явища, до нашого часу, аналітично не отримані загальні закономірності сепарації дрібнодисперсних частинок. Наявні досвідчені дані недостатні, а часто суперечливі.

Для сепарації дрібнодисперсних частинок на стінках каналу можна вивести такі загальні залежності. На рис. 1 представлена принципова схема зміни концентрації частинок по довжині каналу сепарації.

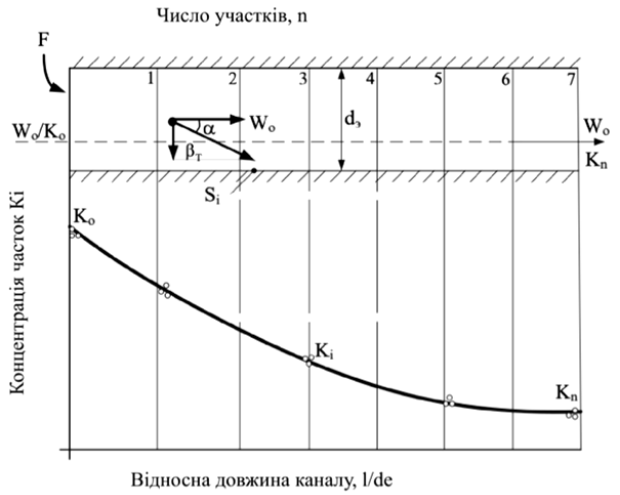
Відповідно до рис. 1 та розрахунків ступеня сепарації на і-тій ділянці каналу буде:

$$\eta_i = \frac{\Delta G_i}{G_0} = \frac{\beta_T \cdot S_i \cdot K_{i-1}}{W_0 \cdot F \cdot K_0} = \frac{\beta_T}{W_0} \cdot \frac{S_i}{F} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{u} \eta_{i-1}\right) \quad (1)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^{u} \eta_i = \frac{\beta_T \cdot S}{W_0 \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^{u} \frac{K_{i-1}}{K_0} \cdot \frac{\beta_T \cdot S}{W_0 \cdot F} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^{u} \eta_{i-1}\right) \quad (2)$$

У рівняннях 1, 2 Go, ΔGi – масова витрата аеродинамічного потоку на вході та його зміна на і-тій ділянці; βТ – коефіцієнт масопереносу аерозолю.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)



F – поперечний переріз каналу, de – еквівалентний діаметр каналу, S – сепаруюча поверхня, l – довжина каналу, Wo – лінійна швидкість аеродинамічного потоку, Ki – концентрація аерозолю в потоці, n – число ділянок розбиття каналу
Рис. 1 – Принципова схема виведення загальної залежності сепарації дрібних частинок

Отримана залежність показує, що ступінь сепарації зростає зі збільшенням ступеня відносного розвитку сепаруючих поверхонь S/F та критерію Маргулісу βT/Wo, що характеризує інтенсивність сепарації. Геометрична інтерпретація критерію Маргуліса (рис. 1) зводиться до відношення векторів середньої статичної швидкості руху частинок упоперек потоку та швидкості потоку вздовж поверхні та характеризується кутом:

$$\alpha = \operatorname{arct}\frac{\beta_T}{W_o} \qquad (3)$$

Аналіз диференціальних рівнянь руху несучого потоку газів Нав'є-Стокса, нерозривності Ейлера, дифузія частинок у потоці несучого середовища та крайових умов [4] дозволив нам виділити систему критеріїв, що характеризують сепарацію дрібнодисперсних частинок. Визначальними критеріями є: критерій Рейнольдса

$Re_0 = \frac{w_0 \cdot d_e}{v_0}$; $\frac{K}{K_0}$; $\frac{S}{F}$ та визначальні критерії Ейлера $E_u = \frac{\Delta P}{\rho_0 \cdot W_0^2}$ та Маргуліса β_T/W_o

Останньому критерію рівнозначні критерії Шмідта $S_c = \frac{v_0}{D}$ або $\frac{D}{W_0 \cdot l_0} = \frac{\beta_T}{W_0} \cdot \frac{\delta}{l_0}$

Як випливає з літературних джерел [4-6], якщо на вході в канал здійснюється осесиметричний рух з обертанням потоку поряд із критерієм Рейнольдса, визначальним критерієм є критерій та фактор початкової закрутки потоку $\Phi = \frac{W_0}{U_0}$, де Uo – характерна осьова швидкість на виході із завихрювача (пристрою, що закручується) і відповідно тиск. У цьому випадку спостерігається сильний вплив поля відцентрових сил на поля інтенсивності пульсації та інших характеристик турбулентності. Причому цей вплив залежить від профілю середньої швидкості. У разі обертання, за законом твердого тіла, відцентрові сили надають стабілізуючий вплив пульсацій швидкості та температури. Навпаки, при інтенсивній закрутці, поле відцентрових сил інтенсифікує пульсаційний рух і процеси переносу. Таким чином, в останньому випадку за рахунок обертання потоку в сепараційній камері, при певних параметрах закрутки, потоки можна істотно збільшити коефіцієнт перенесення βT у 2 – 3 рази.

На рис. 2 температура потоку – 400 °C, Wo = 10 м/с) [7,8].

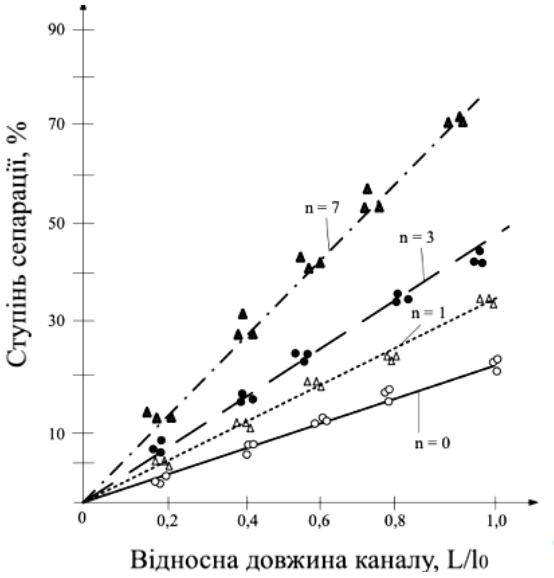


Рис. 2 – Досвідчена залежність сепарації за довжиною каналу

На рис. 3 наведена дослідна залежність сумарної сепарації від ступеня розвитку сепаруючих поверхонь для $Re_o = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$ і тих самих частинок та умов, характеристика яких дана на рис. 2.

В результаті обробки дослідних даних отримано залежності для сепарації в каналах дрібнодисперсних частинок в діапазоні $Re_o = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$.

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} \eta_i \approx 4{,}0\left(\frac{1}{d_e}\right)^{0{,}7} \qquad (4)$$

$$\eta = 2{,}1\frac{S}{S_0} \cdot Re^{1/3} \qquad (5)$$

Сепарація по довжині каналу згасає через зниження концентрації частинок в потоці. Турбулізація потоку (зростання Re) та закрутка інтенсифікують процес.

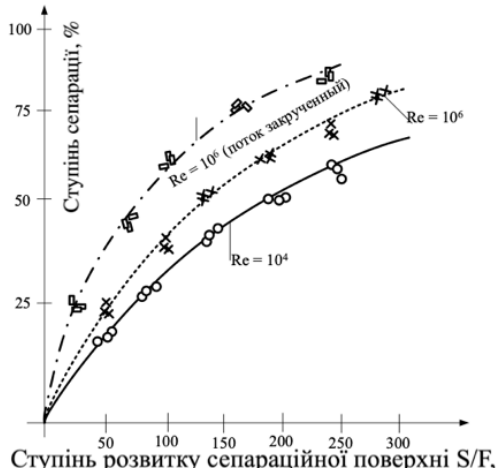


Рис.3 - Залежність сепарації від рівня розвитку поверхні сепарації

У літературних даних, практично відсутні дані і вплив температури потоку на процес сепарації. Взагалі, зміна в'язкості та щільності потоку з температурою, очевидно, вплине на сепарацію частинок. Збільшення в'язкості частинок несучого потоку μо, мабуть, призведе до погіршення сепарації внаслідок зростання сил в'язкості опору руху частинок до стінки. З певністю це важко стверджувати, оскільки не з'ясована залежність критерію Маргуліса від в'язкості несучого середовища. З огляду на це нами наведено дані про вплив температури потоку на ступінь сепарації при використанні частинок з різними розмірами (рис. 4).

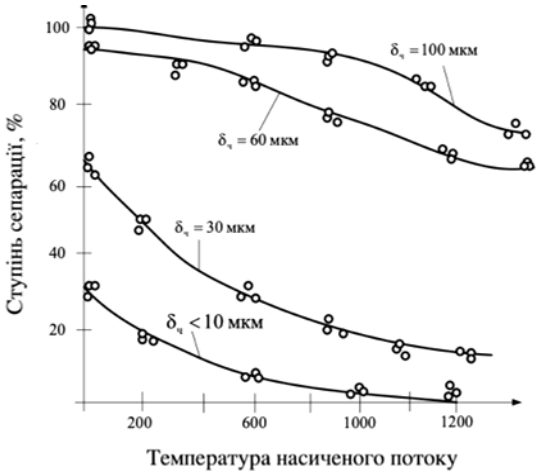


Рис. 4 – Розрахункова зміна ступеня інерційної сепарації частинок від температури несучого потоку за досвідченими даними [9] при поперечному обтіканні циліндра D = 100 мм, $\rho_{год}$ = 2,5 г/см^3 Wo = 10 м/с

Як випливає з наведених даних, при інерційній сепарації з підвищенням температури ступінь сепарації різко знижується, навіть для часток з розміром ~ 100 мкм. Як впливатиме структура потоку при його проходженні через сепаратор за різних початкових умов на показник ступеня сепарації при різних температурах несучого середовища не ясно, хоча, мабуть, тенденція, представлена в роботі [9] буде дотримуватися. Тому, розглянемо вплив та вплив на процес деяких додаткових сил, наприклад, термофорезу [10]. Сила термофорезу виникає при вплив молекул газу з нерівномірно нагрітою частинкою аерозолю. Механізм виникнення цієї радіометричної сили суттєво залежить від величини відношення діаметра частинок $\delta_{год}$ до середньої довжини вільного пробігу молекул l. Остання залежить від температури і тиску газу і має величину близько десятих часток мікрона l = 0,1÷0,6 мкм. У всіх випадках, сила термофорезу, має реактивний характер, і виникає в результаті того, що від більш нагрітої сторони частинки молекул газу відлітають з більшою швидкістю, ніж від менш нагрітої сторони, тому повідомляють імпульс частинці у бік зменшення температури. З погляду сепарації промислових уносів, дослідників мало цікавлять частки розміром δч<<l, оскільки їхня незначна кількість. Сепарація частинок розміром δч>>l відбувається переважно з допомогою сил інерції, котрий іноді тяжкості, і тому, додаткова зовнішня сила термофорезу б'є по русі великих частинок, зовсім незначно. Практичне значення ця сила має для інтенсифікації сепарації частинок розміром від 1÷5 мкм, які є проміжними між крайніми межами. Ця можливість може бути особливо вдало реалізована в умовах високошвидкісних потоків, що обертаються, в яких значна кількість дрібнодисперсного віднесення високотемпературний рівень процесу. Останнє визначає наявність градієнта температур у частках, що потрапили до ламінарного прикордонного шару газу. Для частинок, порівнянних з довжиною вільного пробігу молекул газу, Хетнер [3] запропонована емпірична інтерполяційна формула для сили термофорезу:

$$F_{тф} = -\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot \delta_ч^2}{\frac{2M \cdot P \cdot \delta_ч}{3R \cdot g \cdot \mu_0} + \frac{24 \cdot \mu_0 \cdot T}{\alpha \cdot P \cdot \delta_ч}} \cdot \text{gradT} \qquad (6)$$

де M – молекулярна маса газу; R - Універсальна газова постійна, R = 8,31; μo – динамічна в'язкість при відповідній температурі та тиску; T – температура газу; P – тиск газу; g – прискорення вільного падіння, g = 9,81; δгод – розмір часток; π – математична постійна, π = 3,14.

З рівності сил термофорезу та опору середовища отримуємо швидкість руху частинок до сепараційної поверхні:

$$V = \frac{K \cdot \delta_ч^2 \cdot \text{gradT}}{\frac{2M \cdot P \cdot \delta_ч^2}{R \cdot g \cdot \mu_0} + \frac{72 \cdot \mu_0 \cdot T}{\alpha \cdot P}} \qquad (7)$$

де коефіцієнт: $K = 1 + 2A \cdot \frac{1}{\delta_ч} + 2Q \cdot \frac{1}{\delta_ч} e^{\frac{-b\delta_n}{21}}$ залежить від характеру взаємодії газових молекул із поверхнею частинок від розміру частинок [3].

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Аналітичний розрахунок сепарації під дією сил термофорезу надзвичайно утруднений, зокрема через практичну неможливість розрахунку величин gradT і d для частинки, що сепарується [11]. Тим не менш, при збереженні параметрів аеродинамічного потоку (P, T) можлива організація його сепараційного очищення, наприклад, при послідовному відділенні великих фракцій у циклонах, а потім дрібнодисперсного винесення у вихровій трубі або ротоклоні. Для інтенсифікації сепарації можна використовувати здатність частинок віднесення набувати електричний заряд при проходженні зони високих температур. При цьому може виникнути електростатичне поле в аерозолі, напруженість якого можна порівняти з полем в електрофільтрах [12]. Однак це явище мало досліджено і вимагає подальшого вивчення.

Обговорення результатів

Сформульовано основи механізму сепарації, які зводяться до з'ясування причин та закономірностей руху дрібних частинок до сепаруючої поверхні поперек основного потоку. Докладно проаналізовано механізми сепарації дрібних частинок за рахунок турбулентної дифузії, оцінено можливість реалізації механізму сепарації на основі термофорезу. Встановлено визначальні параметри та критерії, що характеризують процес сепарації частинок. Виведено формули для оцінки стікання сепарації частинок та проаналізовано вплив визначальних критеріїв на цю величину. В результаті аналізу наведених даних зроблено практичні висновки про шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових умовах.

Висновки

В даний час є очевидними наступні шляхи збільшення ступеня сепарації дрібнодисперсних частинок:

1. розвиток сепаруючих поверхонь (S/F) в канальних сепараторах відповідної конструкції та інтенсифікація в них турбулентного масообміну, у тому числі за рахунок закрутки потоків;

2. після відокремлення великих фракцій доцільно використовувати додаткові зовнішні сили: термофорезу, електростатики, електромагнетизму та ін. що дозволить у секціонованому сепараторі забезпечити високий ступінь сепарації результуючого потоку на виході;

3. забезпечення примусової коагуляції частинок за рахунок їх інтенсивного зіткнення в потоці, що рухається (за допомогою ультразвуку) і потім використання принципів інерційної сепарації.

Ці рекомендації за наявності фізико-хімічної інформації про конкретну аеродисперсну систему, що подається на очищення, дозволяють принаймні створювати укрупнені демонстративні установки, на яких при дослідженнях уточнюються основні критерії та полегшується масштабування установок.

Список літератури

1. Глазков В. В. *Техническая газодинамика*. Учебное пособие. Издательство «Лань», 2018. 108 с.
2. Pahija E., Golshan S., Blais B. Perspectives on the process intensification of CO_2 capture and utilization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022. Vol. 176, № 3. P. 67-89. doi: 10.1016/j.cep.2022.108958.
3. Cesari L., Castel C., Favre E. Membrane contactors for intensified gas-liquid absorption processes with physical solvents: A critical parametric study. *Journal of Membrane Science.* 2021. T. 635. P. 119-134. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119377.
4. Shaporev V., Pitak I., Pitak O., Briankin S. Investigation of the functioning of a vortex tu be in supply of disperse flow (gas – dustparticles) to the tube. *Eastern-european journal of enterprise technologies.* 2017. Vol 4, № 10 (88). P. 51-60. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.
5. Халатов А. А., Авраменко А. А., Шевчук И. В. *Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил*: в 4-х т. Киев: Ин-т техн. Теплофизики НАН Украины, 2010. Т. 3: *Закрученные потоки.* 474 с.
6. Veretennikov S. V., Barinov S. N. Experimental investigation of he at transferin energy separation chambers of the vortex tu be. *Vestnik of the Samara State Aerospace University.* 2015. 14 (2). P. 44-51. doi:10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51.
7. Piralishvily S. A., Veretennikov S. V. Vortex effect and intensification of heat and masstrans ferincellenergy technology. *Vestnik of Samara University*. *Aerospace And Mechanical Engineering.* 2011. № 3–1 (27). P. 241−247.
8. Bogomolov A. On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areasin the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 2036–2041. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.290.
9. Chelnokov A. A. *Inzhenernye metody ohrany atmosfernogo vozduha.* Vysheyshaya shkola, 2016. 397 p.
10. Thakare H. R. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tu be: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1043–1071. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.058.
11. Guo X., B. Zhang. Computational investigation of precessing vortex breakdown and energy separation in a Ranque – Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration.* 2018. Vol. 85. P 42-57. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.09.010.
12. Akhmetov D. G. Swirl flow in vortex chamber. *Science Bulletin*. 2015. Vol. 6, Issue 4. P. 109 – 120. doi: 10.17117/nv.2015.04.109.

References (transliterated)

1. Glazkov V. V. *Tehnicheskaya gazodinamika.* Uchebnoe posobie. Izdatelstvo «Lan». 2018. 108 p.
2. Pahija E., Golshan S., Blais B. Perspectives on the process intensification of CO_2 capture and utilization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification,* 2022, Vol. 176, 3, pp. 67-89, doi: 10.1016/j.cep.2022.108958.
3. Cesari L., Castel C., Favre E. Membrane contactors for intensified gas-liquid absorption processes with physical

solvents: A critical parametric study. *Journal of Membrane Science,* 20221, Vol. 635, pp. 119-134, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119377.
4. Shaporev V., Pitak I., Pitak O., Briankin S. Investigation of the functioning of a vortex tu be in supply of disperse flow (gas – dustparticles) to the tube. *Eastern-european journal of enterprise technologies,* 2017, Vol. 4, 10 (88), pp. 51-60. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.
5. Halatov A. A., Avramenko A. A., Shevchuk I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyah centrobezhnih massovih sil*: v 4-h t. Kiev. In-t tehn. Teplofiziki NAN Ukraini, 2010. T. *3: Zakruchennie potoki.* 474 s.
6. Veretennikov S. V., Barinov S. N. Experimental investigation of he at transferin energy separation chambers of the vortex tu be. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2015, 14 (2), pp. 44-51, doi:10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51.
7. Piralishvily S. A., Veretennikov S. V. Vortex effect and intensification of heat and masstrans ferincellenergy technology. *Vestnik of Samara University*. *Aerospace And Mechanical Engineering,* 2011, 3–1 (27), pp. 241−247.
8. Bogomolov A. On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areasin the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF. *Procedia Engineering,* 2016, Vol. 150, pp. 2036–2041, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.290.
9. Chelnokov A. A. *Inzhenernye metody ohrany atmosfernogo vozduha. Vysheyshayashkola*, 2016. 397 p.
10. Thakare H. R. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tu be: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 2015, Vol. 52, pp. 1043–1071, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.058.
11. Guo X., Zhang B. Computational investigation of precessing vortex breakdown and energy separation in a Ranque – Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration,* 2018, Vol. 85, pp. 42-57, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.09.010.
12. Akhmetov D. G. Swirl flow in vortex chamber. *Science Bulletin,* 2015, Vol. 6, Issue 4, pp. 109–120, doi: 10.17117/nv.2015.04.109.

Відомості про авторів (About authors)

Витяганець Валентин Сергійович − Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

Valentin Vytiaganets − National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

Байрачний Володимир Борисович - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор, кандидат технічних наук, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8397-3489; E-mail: bairachniyvb@gmail.com E-mail: bairachniyvb@gmail.com

Volodymyr Bairachnyi - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor, associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8397-3489; E-mail: bairachniyvb@gmail.com

Пітак Інна Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічна техніка та промислова екологія, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Inna Pitak – PhD, associate professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Баранова Антоніна Олегівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доктор філософії в галузі екології, ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Antonina Baranova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", PhD, senior lecturer at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranovaa647@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Витяганець В. С., Байрачний В. Б., Пітак І. В., Баранова А. О. Дослідження інтенсифікації процесів сепарації з використанням тепла відходящих газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 74-79. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11.

Please cite this article as:

Vytiaganets V., Bairachnyi V., Pitak I., Baranova A. Investigation of the intensification of separation processes using the heat of exhaust gases. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 74–79, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11.

Надійшла (received) 17.05.2022