

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

**СОЛОДКА АНТОНІНА ВАСИЛІВНА**

УДК 536.24:66.045.132



**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАХ  
З ГРАНУЛЬОВАНИМИ НАСАДКАМИ**

Спеціальність **05.14.06** – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

*Дисертація є рукописом*

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій  
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
**Бошкова Ірина Леонідівна**,  
доцент кафедри теплоенергетики та  
трубопровідного транспорту енергоносіїв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Лабай Володимир Йосифович**,  
професор кафедри „Теплогазопостачання та  
вентиляція” Національного університету  
„Львівська політехніка”

Кандидат технічних наук, професор  
**Титар Сергій Семенович**,  
професор кафедри теплових електричних станцій  
та енегозберігаючих технологій Одеського  
національного політехнічного університету

Захист дисертації відбудеться « 21 » червня 2018 р. о 13<sup>00</sup> год в ауд. 108 на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 ОНАХТ за адресою: вул.  
Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної  
академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна,  
65082.

Автореферат розісланий « 04 » 05 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



І. Мілованов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Значну частину теплових втрат в енергетичних та теплотехнічних установках різного призначення становить фізична теплота відхідних газів, використання якої може бути скероване на підвищення ефективності виробничих процесів. Однак доцільність утилізації теплоти не завжди обґрунтована, що пов'язано, загалом, з браком розробок ефективних теплоутилізаторів, зокрема для утилізації низькопотенційної теплоти, та з невизначеністю даних з раціональних теплових режимів їх роботи. Техніко-економічна доцільність використання теплоутилізаторів з низькими температурними напорами може бути підвищена за використання теплоносієм гранульованої насадки. Теплоутилізаційні установки контактного типу, для яких характерний безпосередній теплообмін газу (повітря) з шаром часток, мають значний потенціал підвищення ефективності їх використання, про що свідчать роботи Прутських В. А. і Медведєва В. Б. та інших авторів. Високу теплову ефективність демонструють рекуперативні теплообмінники із щільним рухомим шаром, відповідно роботам З. Р. Горбіса, В. О. Календер'ян, М. Alizadeh та ін., окрім того, вони характеризуються компактністю, невеликою масою, простотою конструкції, надійністю. Використання проточних дисперсних теплоносіїв у теплоенергетиці дозволяє інтенсифікувати процеси тепло- і масообміну, відповідно дослідженням М. Rady, S. Sunft, Л. С. Реви. Виникає можливість створювати розвинену поверхню нагрівання у вигляді безупинно рухливих, спеціально обраних часток. Однак, для промислового впровадження недостатньо надійних даних з теплообміну між щільним шаром часток і газом. Окремим питанням є розроблення теплоутилізаторів з нерухомим шаром, за якими значно менше досліджень. Визначення раціональних режимних параметрів роботи теплоутилізаторів також залежить від адекватної математичної моделі процесу теплообміну між потоками газу і гранульованого матеріалу та надійних даних для коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну, для отримання яких потрібні додаткові експериментальні дослідження. Аналітичні залежності як результат розв'язування математичної моделі потрібні для відображення розподілення температур в гранульованому матеріалі та газі для підприємств з різним рівнем температури та витратами газового потоку, що дозволить оптимізувати конструкторські рішення під час проектування апаратів відповідно із цільовими напрямками. Отже, видається доцільним застосування теплоутилізаторів із гранульованою насадкою на виробництвах, які характеризуються відносно невисоким температурним рівнем відхідних газів, тому визначення умов інтенсифікації процесу теплообміну у теплоутилізаторах із гранульованою насадкою є **актуальним** науковим і технологічним завданням у сучасних умовах розвитку енергетики та економіки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Закону України «Про енергозбереження», затвердженого Постановою Верховної Ради України № 74/94 01.07.1994 р.; «Основних положень енергетичної стратегії України на період до 2030 рр.», прийнятих Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.; Закону Кабінету Міністрів України № 148 від 5.02.97 р., що затвердив «Комплексну Державну Програму

Енергозбереження». Робота є складовою частиною досліджень, проведених в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи МК 17/03 "Розробка мікрохвильових пристроїв для інтенсифікації процесів переносу теплоти та маси з матеріалів рослинного походження" (номер держреєстрації 0117U000365). Робота є продовженням і розвитком досліджень теплоперенесення у щільних дисперсних системах, проведених на кафедрі теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв (ТТТЕ) ОНАХТ.

**Мета та задачі досліджень.** Метою дослідження є обґрунтування та розвиток науково-технічних рішень з інтенсифікації процесів теплообміну в теплоутилізаторах із гранульованою насадкою.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

- визначити сучасний стан питань утилізації низькопотенційної теплоти та проаналізувати теоретичні і фізичні уявлення стосовно процесу теплообміну між шаром гранульованого матеріалу та газовим середовищем;

- створити експериментальний стенд для дослідження процесу теплообміну між газовим (повітряним) потоком та гранульованою насадкою, рухомою та нерухомою;

- експериментально дослідити процес теплообміну між наскрізним газовим потоком та гранульованою насадкою із керамзиту і гравію, рухомою та нерухомою, та визначити вплив швидкості фільтрації газу, швидкості руху гранульованої насадки, виду гранульованого матеріалу, вхідної температури газу, що гріє, діаметру часток на інтенсивність нагрівання;

- узагальнити дані для коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну між наскрізним газовим потоком та шаром гранульованого матеріалу, рухомим і нерухомим, у вигляді безрозмірних емпіричних залежностей;

- розробити математичну модель процесу теплоперенесення у системі «газовий потік – щільний рухомий шар гранульованої насадки» для стаціонарного процесу та отримати залежності для розрахунку температур компонентів;

- провести аналіз теоретичних і емпіричних даних і визначити умови для підвищення ефективності теплоутилізаторів з гранульованими насадками;

- розробити схеми теплообмінників регенеративного типу із гранульованою насадкою для утилізації вторинних енергоресурсів та виконати теплові конструкторські розрахунки, провести порівняльний аналіз утилізаторів з рухомим та нерухомим шаром.

**Об'єкт дослідження** – процес теплообміну в теплоутилізаторі з насадкою у вигляді щільного шару гранульованого матеріалу, рухомого та нерухомого, та наскрізного потоку газового (повітряного) середовища.

**Предмет дослідження** – температурний режим гранульованої насадки теплоутилізатора та наскрізного повітряного потоку, основні характеристики процесу перенесення теплоти між шаром часток і наскрізним потоком газу.

**Методи досліджень** – методи математичного моделювання процесів теплоперенесення у стаціонарному та нестаціонарному режимах, методи експериментального дослідження процесів теплообміну щільного шару гранульованої насадки з наскрізним газовим потоком; методи статистичного та

кореляційного аналізу експериментальних даних; методи обчислювальної математики, алгоритмізації розрахунків і програмування з використанням програм, розроблених у системі Maple, Exel та Origin.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

- вперше на підставі рішення рівнянь двокомпонентної математичної моделі теплообміну між наскрізним газовим потоком та потоком гранульованого матеріалу, в одномірному наближенні, отримані аналітичні залежності для розрахунків температур газового теплоносія і шару матеріалу за висотою теплообмінного апарату для стаціонарного режиму. На відміну від існуючих математичних моделей, які представляють процес міжкомпонентного теплообміну в загальному вигляді та розв'язуються наближеними математичними методами або розглядається суттєво спрощена однокомпонентна модель, розроблена в роботі математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь для газового та твердого компонентів дозволила отримати за точними аналітичними методами залежності для розрахунку температур компонентів при прямоочній схемі руху та протитечії;

- вперше встановлено, що при нагріванні щільного нерухомого шару матеріалу газовим (повітряним) середовищем зміна за часом середнього за висотою каналу коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну описується функцією класу сигмоїд;

- встановлено, що в теплоутилізаторі з рухомим шаром гранульованого матеріалу (при швидкості до  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м/с) порівняно з нерухомим інтенсивність теплообміну вища. На відміну від існуючих уявлень, за якими теплообмін в рухомому шарі може бути в 5-7 разів менш інтенсивний у порівнянні з нерухомим, в роботі встановлено, що інтенсивність теплообміну для рухомого шару вище, що пояснюється неможливістю розрідження шару у стінок каналу внаслідок встановлення стрижнеподібної форми руху часток при малих швидкостях потоку;

- вперше визначено, що інтенсифікація теплообміну виникає за використання суміші часток різного розміру. На відміну від існуючих даних, що отримані для гранульованих насадок з часток однієї форми та одного розміру, в роботі проведено порівняльну оцінку інтенсивності теплообміну при використанні гранульованої насадки з однакових та різних часток за розміром;

- вперше запропонована методика теплового розрахунку теплообмінника-регенератора з нерухомою гранульованою насадкою, призначеного для утилізації низькопотенційної теплоти газів, що відходять, яка враховує змінність за часом середнього коефіцієнту міжкомпонентного теплообміну.

**Наукове значення роботи.**

Отримані аналітичні залежності для визначення температур газового та твердого компонентів дозволяють розрахунковим шляхом встановити розподілення температур за висотою регенеративного теплообмінника з гранульованою насадкою та оцінити вплив витрат і вхідних температур компонентів, виду твердих часток та їх визначального розміру на теплообмін в рухомому шарі гранульованого матеріалу для протитечії та прямотечії. Факт відповідності характеру зміни середніх коефіцієнтів міжкомпонентного теплообміну функції класу сигмоїд обґрунтовує подальші дослідження особливостей теплообміну між нерухомими частками та потоком газового або рідкого середовища, оскільки сигмоїду використовують в

якості функцій активації, яка дозволяє як посилювати слабкі сигнали або потоки, так і ослаблювати сильні.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Рекомендації з вибору режимів роботи теплоутилізаторів із щільним шаром гранульованої насадки, рухомою та нерухомою, зокрема рекомендації щодо встановлення обмежень кінцевої температури нерухомого шару, вибору швидкості руху матеріалу та його вид, спрямовані на підвищення ефективності утилізації теплоти та створюють умови для виготовлення і ефективного використання теплоутилізаторів на підприємствах, що характеризуються відносно невисоким температурним рівнем відхідних газів.

Емпіричні залежності в безрозмірному вигляді необхідні як складова розроблених методик теплових конструкторських розрахунків теплоутилізаторів з гранульованою насадкою, рухомою та нерухомою, промислового призначення.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготування фахівців за спеціальністю 144 "Теплоенергетика" під час викладання дисциплін: "Теплоносії та тепломасообмінні апарати", «Методи дослідження процесів теплообміну», "Методологія та організація наукових досліджень", а також під час виконання магістерських кваліфікаційних робіт.

### **Особистий внесок здобувача.**

Розроблена нова експериментальна установка для проведення експериментів з дослідження процесів теплообміну між потоком повітря та щільним шаром матеріалу, рухомим та нерухомим. Проведені експерименти з різними видами часток для визначення ефективності міжкомпонентного теплообміну у широкому діапазоні змін режимних параметрів. Отримана математична модель процесу теплообміну між газовим потоком та щільним шаром дисперсного матеріалу в стаціонарному режимі. Отримані аналітичні залежності для локальних температур газового та твердого компонентів, проведені розрахунки температур за висотою теплообмінного апарату. Виконаний аналіз результатів експериментів і розрахунків теплових характеристик, проведено узагальнення даних. Сформульовано висновки та рекомендації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на конференціях і семінарах: XV-XVII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (Одеса, 2015); V Міжнародна науково-технічна конференція: «Казахстан-Холод 2015» (Казахстан, 2015); Міжнародній конференції «Energi of Moldova – 2015. Regional aspect of development» (Кишинів, 2015); VI Міжнародній науково-технічній конференції: «Казахстан-Холод 2016» (Казахстан, 2016); Міжнародній конференції «Energi of Moldova – 2016. Regional aspect of development» (Кишинів, 2016); XI Міжнародній заочній науково-практичній конференції: «Розвиток науки в XII столітті», (Харків, 2016); V Міжнародній мультинауковій конференції: «Осінні наукові читання», (Київ, 2016); VII Міжнародній науково-технічній конференції: «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2016); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (Херсон, 2016); XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції

молодих учених і студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (Одеса, 2016); VII Міжнародній науково-технічній конференції: «Казахстан-Холод 2017» (Казахстан, 2017); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства». – Київ, НУБіП України. – 2017; XVII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (Одеса, 2017).

**Публікації.** За результатами роботи опубліковано 20 праць, з яких 5 наукових статей у фахових виданнях, 14 в матеріалах конференцій та 1 публікація з індексуванням в наукометричній базі Scopus.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, що містить 141 джерело, і 7 додатків. Робота викладена на 146 сторінках друкованого тексту основної частини, включаючи 71 рисунок і 20 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, охарактеризована наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, сформульовані основні положення, що виносяться автором на захист.

**У першому розділі** аналізується сучасний стан теорії і практики утилізації теплоти, зокрема низькопотенційної. Визначені основні проблеми утилізації ВЕР та умови підвищення ефективності систем утилізації теплоти газів, що відходять (А. А. Долінський, Н. М. Фіалко, Р. И. Арнов). Відзначається, що значну частину теплових ВЕР становить фізична теплота газів (Y. Ammar). Визначені основні джерела теплової енергії на підприємствах і встановлені необхідні витрати повітря для забезпечення теплового режиму на харчових підприємствах і ресторанного бізнесу. Вивчені типи теплообмінних пристроїв для утилізації теплоти. Розвиток енергозберігаючих методів на основі застосування теплоносіїв у вигляді шару твердих часток показала свою ефективність (Y. Ding, D. M. Snider). У даний час витікання різних сипких матеріалів порівняно добре вивчене для умов, які називають умовами вільного гравітаційного витікання. Однак, під час проектування регенеративних теплообмінників із гранульованою насадкою необхідно мати відомості про вплив ряду факторів на теплообмін між частками та газом. Встановлено, що отримані розрахункові залежності для коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну обмежені формою часток і матеріалом, з якого вони виготовлені. Загалом дослідження проводилися на частках класичної форми одного розміру, полідисперсна суміш часток реальних розмірів практично не вивчалася. Визначена доцільність розробки двокомпонентної моделі, основа якої створена професорами В. А. Календер'ян і З. Р. Горбісом.

**У другому розділі** наведені результати аналітичного дослідження теплообміну між потоками газу та щільного рухомого шару часток. Для одержання аналітичним шляхом інформації про розподілення температур у теплоутилізаторі контактного типу, в якому одним з теплоносіїв є гранульований матеріал, розроблені математичні моделі теплообміну між твердими частками та газовим

середовищем, що рухаються за схемою прототечії і протитечії. Схема ділянки теплообміну з протитечійним рухом теплоносіїв подана на рис. 1.

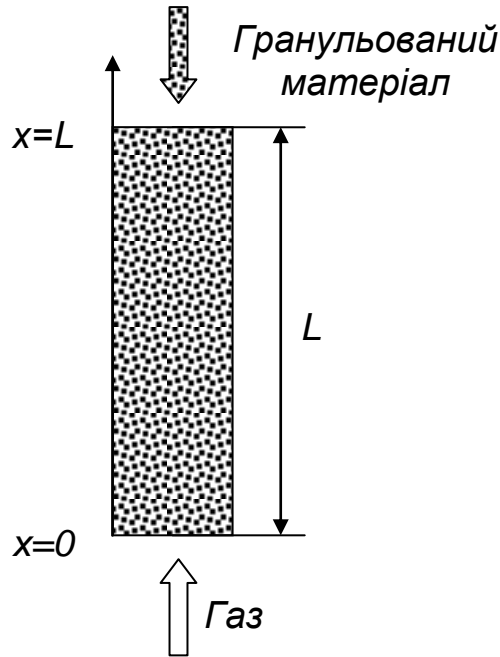


Рис. 1. Схема ділянки теплообміну між потоками газу і гранульованого матеріалу

Газовий (повітряний) потік подавався знизу ( $x = 0$ ), гранульований матеріал надходив у теплообмінну ділянку зверху ( $x = L$ ) (де  $L$  - висота шару,  $x$  - поздовжня координата). Тепломасоперенесення у контактному теплообміннику для одномірної задачі описується такою системою рівнянь:

- рівняння енергії для газового компонента:

$$c_{\Gamma}\rho_{\Gamma}\varepsilon\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial \tau} = \lambda_{\Gamma}^* \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} - c_{\Gamma}\rho_{\Gamma}\varepsilon w_{\Gamma} \frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x} - \alpha_{\text{М}} a_{\text{ПИТ}} (t_{\Gamma} - t_{\text{T}}); \quad (1)$$

- рівняння енергії для твердого компонента:

$$c_{\text{T}}\rho_{\text{T}}(1-\varepsilon)\frac{\partial t_{\text{T}}}{\partial \tau} = \lambda_{\text{T}} \frac{\partial^2 t_{\text{T}}}{\partial x^2} - c_{\text{T}}\rho_{\text{T}}(1-\varepsilon)w_{\text{T}} \frac{\partial t_{\text{T}}}{\partial x} + \alpha_{\text{М}} a_{\text{ПИТ}} (t_{\Gamma} - t_{\text{T}}), \quad (2)$$

де  $c_{\Gamma}$ ,  $c_{\text{T}}$  – питома теплоємність газу і твердого матеріалу, відповідно;  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_{\text{T}}$  – щільність (густина) газу та твердого компонента, відповідно;  $\lambda_{\Gamma}^*$ ,  $\lambda_{\text{T}}$  – коефіцієнт теплопровідності газу ефективний і твердого матеріалу, відповідно (Вт/(м·К));  $w_{\Gamma}$ ,  $w_{\text{T}}$  – швидкість газу та шару сипучого твердого матеріалу в апараті;  $a_{\text{ПИТ}}$  – питома поверхня часток в одиниці об'єму шару ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ),  $\varepsilon$  – порозність шару матеріалу;  $\alpha_{\text{М}}$  – коефіцієнт міжкомпонентного конвективного теплообміну між газом і частками матеріалу (Вт/( $\text{м}^2\cdot\text{К}$ )), визначений за рівнянням (3):

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{Q}{F_{\text{М}}(\bar{t}_{\Gamma} - \bar{t}_{\text{T}})}; \quad (3)$$

$F_M$  – площа поверхні теплообміну, тобто поверхня часток, що перебувають у теплообмінній ділянці апарату,  $m^2$ :

$$F_M = V \cdot a_{\text{пит}}; \quad (4)$$

$V$  – об'єм теплообмінної ділянки,  $m^3$ .

Оскільки у двокомпонентній моделі, відповідно до робіт проф.

Календер'ян В. О., для значень наведеного числа Пекле  $Re^* = \frac{\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} w_{\Gamma} D}{\lambda_{\Gamma}^*} \geq 50$ , де  $\lambda_{\Gamma}^*$  –

ефективний коефіцієнт теплопровідності газу, можна знехтувати кондуктивним теплоперенесенням у рівнянні енергії газового компонента, тобто прийняти

$\lambda_{\Gamma}^* \cdot \frac{d^2 t_{\Gamma}}{dx^2} = 0$ . Також на підставі аналізу розрахунку теплового потоку, що

переноситься по каналу як ребру круглого перетину (стрижню) в припущенні, що канал заповнений матеріалом з теплофізичними властивостями твердих часток, отримано, що для твердого компонента повздовжнє кондуктивне теплоперенесення зневажливо мале, тобто в рівнянні енергії твердого компонента приймаємо

$\lambda_{\Gamma} \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} = 0$ . Для вивчення стаціонарного процесу і за нехтування перенесенням

теплоти теплопровідністю у газовому (повітряному) середовищу та у шарі матеріалу (як достатньо малим порівняно з конвективним перенесенням), рівняння енергії (1) і (2) привели до такого виду:

- для газового компонента:

$$c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} \varepsilon w_{\Gamma} \frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x} = \alpha_M a_{\text{пит}} (t_{\Gamma} - t_{\Gamma}); \quad (6)$$

- для твердого компонента

$$c_T \rho_T (1 - \varepsilon) w_T \frac{\partial t_T}{\partial x} = \alpha_M a_{\text{пит}} (t_{\Gamma} - t_T). \quad (7)$$

Граничні умови:

$$x = 0: t_{\Gamma} = t_{\Gamma 0}; \quad x = L: t_T = t_{\Gamma 0}. \quad (8)$$

Початкові умови:

$$\tau = 0: t_{\Gamma} = t_{\Gamma 0}; \quad t_T = t_{\Gamma 0}. \quad (9)$$

У результаті розв'язування системи рівнянь (6), (7) з умовами (8), (9) отримані залежності для розрахунків локальних температур газового та твердого компонентів для протитечії:

$$t_{\Gamma}(x) = C_1 + C_2 \cdot \exp\left(\frac{K_2(K_3 - K_4)x}{K_3 K_4}\right); \quad (10)$$

$$t_T(x) = C_1 + \frac{C_2}{K_4} \cdot \exp\left(\frac{K_2(K_3 - K_4)x}{K_3 K_4}\right), \quad (11)$$

де  $C_1, C_2$  – коефіцієнти, зумовлені заданими умовами однозначності, форма яких подана залежностями (12), (13):

$$C_1 = t_{r0} + \frac{K_4(t_{r0} - t_{T0})}{\exp(K_5 \cdot L) \cdot K_3 - K_4}; \quad (12)$$

$$C_2 = -\frac{K_4(t_{r0} - t_{T0})}{\exp(K_5 \cdot L) \cdot K_3 - K_4}. \quad (13)$$

Залежності отримані за допомогою пакета прикладних програм MAPLE 15, причому для протитечії враховувалося, що знак градієнта температур має прив'язку до початку координат. Коефіцієнти  $K_2, K_3, K_4$  являють собою комбінації із заданих величин, що характеризують процес:

$$K_2 = \alpha_m \cdot a_{\text{шт}}, \quad K_3 = c_r \cdot \rho_r \cdot w \quad (14)$$

Отримані залежності для розрахунків температур при прямотечії:

$$t_r(x) = C_1 + C_2 \cdot \exp\left(-\frac{K_2(K_4 + K_3)x}{K_4K_3}\right), \quad (15)$$

$$t_T(x) = \frac{C_1 + C_2 \cdot \exp\left(\frac{K_2(-K_4 + K_3)x}{K_4K_3}\right) K_3}{K_4}, \quad (16)$$

Коефіцієнти  $C_1, C_2$  в рівняннях (15), (16) визначаються наступними залежностями:

$$C_1 = t_{r0} - \frac{(t_{r0} - t_{T0})K_4}{K_4 + K_3}, \quad (17)$$

$$C_2 = \frac{K_4(t_{r0} - t_{T0})}{K_4 + K_3}, \quad (18)$$

Результати розрахунків температур газового та твердого компонентів для протитечії і прямотечії представлені на рис. 2а і рис. 2б, відповідно. Розрахунки проводили за  $\bar{\alpha}_m = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), висоти шару  $L = 0,52$  м, порозності  $\varepsilon = 0,47$ , середньої швидкості руху щільного шару керамзиту  $w_T = 8,3 \cdot 10^{-4}$  м/с, середньої швидкості повітря  $w_r = 1,3$  м/с. Зіставлення експериментальних і розрахункових даних за протитечійною схемою руху потоків показало задовільне співпадіння результатів. Для шару керамзиту з частками  $d_e = 0,0097$  м за  $\bar{\alpha}_m = 36$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) розрахункові дані температур часток мають розбіжність з експериментальними на рівні 4,4% для вхідного перерізу апарату ( $x=0$  м) та 0,8% для вихідного перерізу,

розбіжність для температури повітря складає 0,4%. За використання гравію в якості гранульованого матеріалу з  $d_e=0,021$  м за  $\bar{\alpha}_m=106$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) розрахункові та експериментальні дані різняться для часток на 1,2% за  $x=0$  м та на 3,4% за  $x=0,4$  м; для температури повітря – на 6,9% за  $x=0,52$  м.

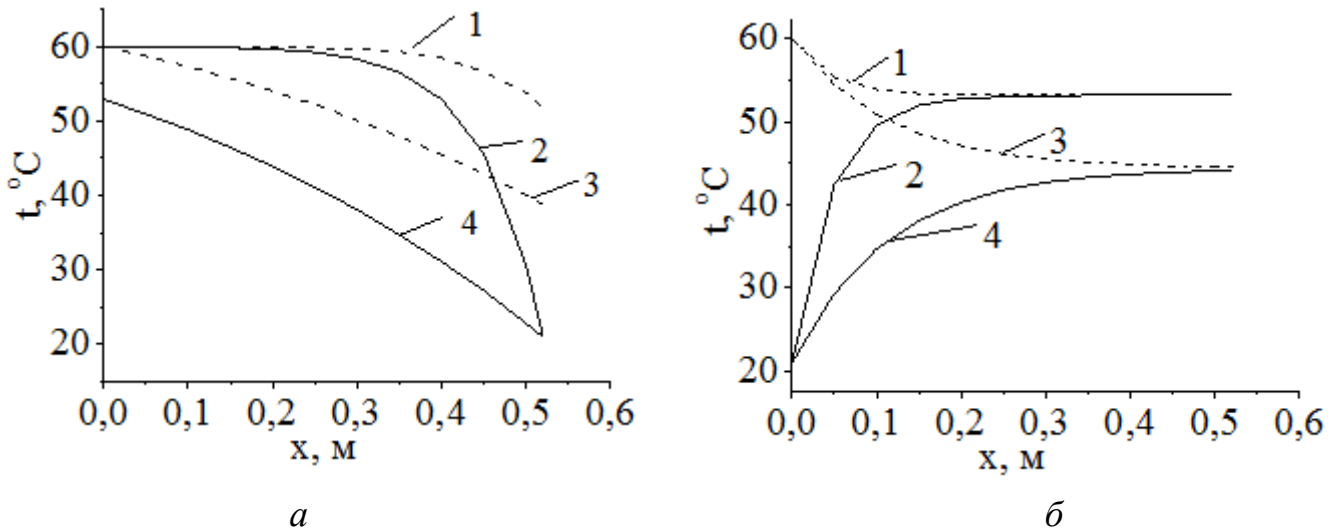


Рис.2. Розподілення температур газового та твердого (гранульованого) теплоносіїв за висотою каналу під час протитечії (а) та прямотечії (б):

1 – повітря (теплообмін з керамзитом); 2 – керамзит;  
3 – повітря (теплообмін з гравієм); 4 – гравій

Результати розрахунків свідчать про інтенсивність теплообмінних процесів за використання гранульованого матеріалу. Як для прямотечії, так і для протитечії практично повне вирівнювання температур під час нагрівання керамзиту відбувається на ділянці каналу довжиною  $L \approx 0,3$  м (для умов наведеного прикладу). Для гравію вирівнювання температур спостерігається на висоті  $L \approx 0,5$  м. Результати розрахунків дозволяють зробити висновок, що нагрівання керамзиту здійснюється значно інтенсивніше нагрівання гравію, що пов'язане з відмінностями їх теплофізичних властивостей. Так, теплоємність гравію  $c_{гр} = 750$  Дж/(кг·К), щільність  $\rho_{гр} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>; теплоємність керамзиту  $c_k = 840$  Дж/(кг·К), щільність  $\rho_k = 825 - 950$  кг/м<sup>3</sup>. Отримані залежності дозволяють аналітично досліджувати процеси теплообміну та можуть бути запропоновані для оцінки впливу геометричних і фізичних характеристик на ефективність роботи теплоутилизаторів з гранульованою насадкою.

У **третьому розділі** наведені результати експериментального дослідження теплообміну між потоком попередньо нагрітого повітря та щільним шаром матеріалу, рухомим і нерухомим. Дослідження проводились з використанням гравію і керамзиту. Попередньо була проведена оцінка порозності шару  $\varepsilon$  і еквівалентного діаметру часток  $d_e$ . Отримано, що порозність шару керамзиту становить  $\varepsilon_k = 0,42$  (велика) та  $\varepsilon_k = 0,37$  (дрібна); порозність шару гравію  $\varepsilon_{гр} = 0,5$ . Матеріали, що застосовувались в експерименті, є полідисперсними, для яких визначені такі

значення середнього еквівалентного діаметру часток: для керамзиту  $\bar{d}_e = 0,019$  м та гравію  $\bar{d}_e = 0,021$  м.

Схема експериментальної установки, що була розроблена та виготовлена для проведення досліджень процесу теплообміну між шаром гранульованого матеріалу, рухомим і нерухомим, та потоком повітря, наведена на рис. 3.

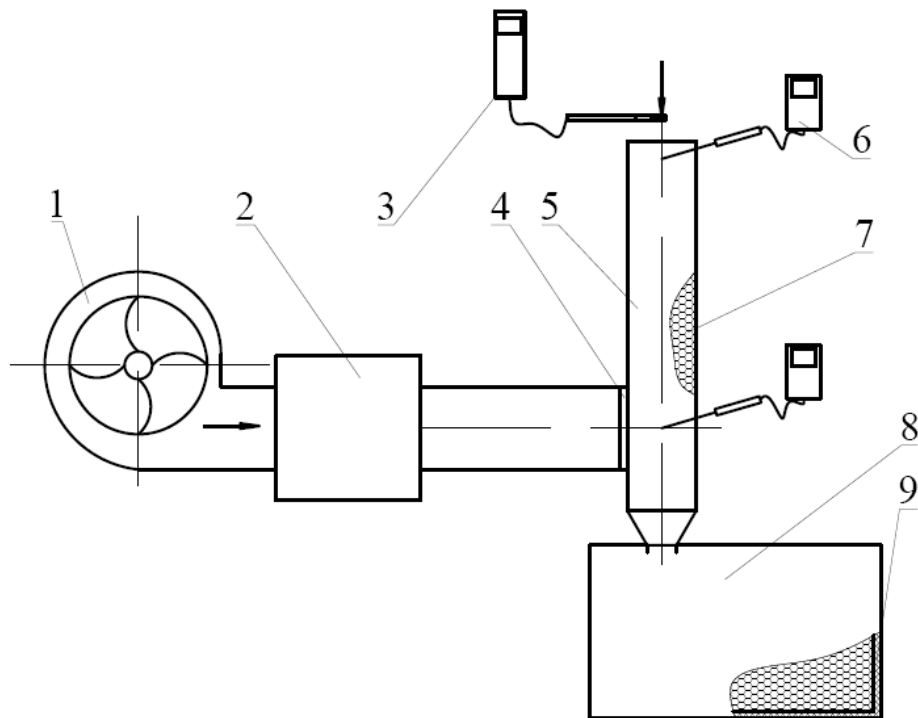


Рис. 3. Установка для експериментального дослідження теплообміну в щільному шарі гранульованого матеріалу:

- 1 – вентилятор; 2 – нагрівник; 3 – анемометр; 4 – сітка; 5 – робоча камера;  
6 – термометр; 7 – гранульований матеріал;  
8 – ємність збору дисперсного матеріалу; 9 – ізоляція

Методика експерименту полягала в наступному. Установлювалася задана температура повітря на регуляторі, включалися вентилятор 1 і нагрівник 2. Витрата повітря регулювалася шибером на вході вентилятора. Після виходу установки в стаціонарний режим засипався матеріал із заданою масою та починали проводитися заміри температури. Сітка 4 запобігала влученню гранул у повітропровід. Для заміру швидкості повітря використовувався анемометр 3 (АТТ–1004). Під час всіх замірів визначалися температури повітря на вході  $t'_{\text{п}}$  та виході  $t''_{\text{п}}$ , температури матеріалу на вході  $t'_m$  ( $x=L$ ) і виході  $t''_m$  ( $x=0$ ), а також температура матеріалу на відстані 0,12 м від рівня засипання теплообмінної ділянки. Максимальна висота шару становила 0,52 м, діаметр каналу – 0,1 м. Заміри температур здійснювалися з інтервалом часу 30 с. Температура повітря на вході варіювалася від 50 до 80 °С. За отриманими результатами визначалися основні характеристики теплообміну між повітрям і гранульованою насадкою.

Експерименти з нерухомим шаром показали, що температура матеріалу за висотою суттєво відрізняється. На рис. 4 представлені залежності зміни температур компонентів (повітря та керамзит) від часу, ці залежності були типовими для всіх дослідів. Температура матеріалу на виході не перевищувала  $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а інтенсивне нагрівання матеріалу закінчувалось після  $600\text{ с}$  за температури  $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Інтенсивність нагрівання матеріалу у вхідному перетині знижувалась після  $240\text{ с}$  роботи. За однакової маси завантаження (криві 1, 2) та однакової температури нагрівання, що відповідає точці перелому кривої 2а ( $t = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), темп нагрівання для кривої 1а (рис. 4) становить  $0,83\text{ К/с}$ , а для кривої 2а (рис. 4) –  $0,12\text{ К/с}$ .

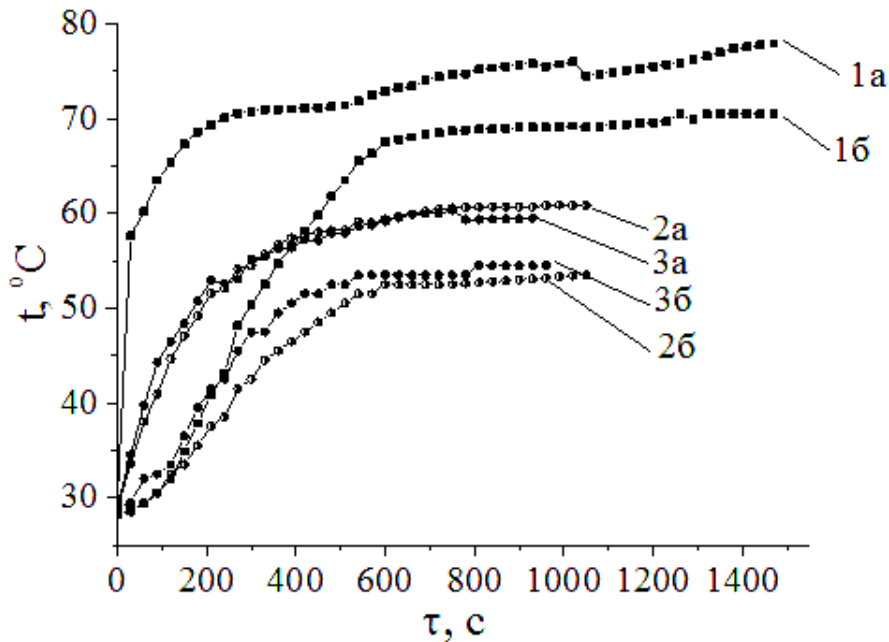


Рис. 4. Зміна температури керамзиту у вхідному (а) і вихідному (б) перетині апарата:

1 – температура повітря на вході в апарат  $t_{\text{п}}' = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

2,3 – температура повітря на вході  $t_{\text{п}}' = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 1,2 – маса завантаження  $m = 2,01\text{ кг}$ ;

3 – маса завантаження  $m = 1,7\text{ кг}$

На рис. 5 представлений хід температурних кривих для повітря та матеріалу. Можна бачити (рис. 5), що на виході з апарата температура повітря практично відповідає температурі матеріалу. Це свідчить про повноту поглинання теплоти, переданої повітрям. Крива 2 має згладжений вигляд порівняно із кривою 1, тому що являє собою результат усереднення даних за температурою для трьох повторних експериментів. У вихідному перетині найяскравіше прослідковувались дві ділянки нагрівання: ділянка інтенсивного нагрівання зі сталою швидкістю, та ділянка, на якій температура матеріалу практично не змінювалась. Після першої ділянки тепловий потенціал повітря використовувався малоефективно. За результатами аналізу кривих температур, що отримані експериментально, визначено, що доцільно встановлювати кінцеву температуру нагрівання матеріалу на рівні  $80\%$  від значення температури газу на вході. Подальше витримування матеріалу в апараті

супроводжується зниженням темпу нагрівання, що призводить до зменшення його ефективності. Дослідження впливу вхідної температури повітря на вході в апарат довело, що за її збільшення з 60 °С до 80 °С призводить до збільшення темпу нагрівання керамзиту у 1,5 рази.

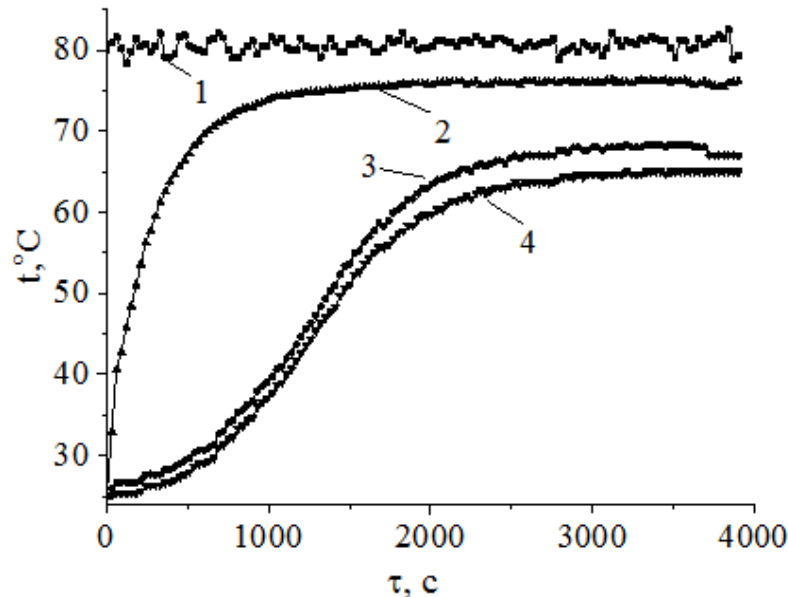


Рис. 5. Зміна температури повітря і керамзиту у часі:

1 – температура повітря на вході в апарат; 2 – температура матеріалу за  $x = 0$  м;  
3 – температура повітря на виході з апарату; 4 – температура матеріалу за  $x = 0,52$  м;  
 $w_{\phi} = 1,0\text{--}2,0$  м/с;  $t'_{\text{п}} = 80$  °С;  $L = 0,52$  м;  $m = 5,25$  кг

Для розрахунків  $\bar{\alpha}_M$  враховувалася площа поверхні міжкомпонентного теплообміну  $F_{\text{пов}}$ . Розрахунки  $F_{\text{пов}}$  для керамзитового шару призвели до одержання таких даних: за висотою шару  $L = 0,52$  м –  $F_{\text{пов}} = 0,67$  м<sup>2</sup>; за висотою шару  $L = 0,39$  м –  $F_{\text{пов}} = 0,51$  м<sup>2</sup>. Для гравію за  $L = 0,52$  м –  $F_{\text{пов}} = 0,59$  м<sup>2</sup>; за  $L = 0,39$  м –  $F_{\text{пов}} = 0,44$  м<sup>2</sup>. Аналіз даних за зміною середніх коефіцієнтів  $\bar{\alpha}_M$ , що отримані для нерухомого шару гранульованих матеріалів, призвів до висновку, що характер кривих відповідає рівнянням класу сигмоїд, які узагальнювались емпіричною залежністю (19):

$$\text{Nu} = \left( \frac{-5,04}{1+10^{-1,63 \cdot \left(0,23 - \frac{G_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \tau}{m \cdot c_{\Gamma}}\right)}} + \frac{5,14}{1+10^{-1,32 \cdot \left(1,47 - \frac{G_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \tau}{m \cdot c_{\Gamma}}\right)}} + 0,44 \right) \cdot \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}. \quad (19)$$

де  $\text{Nu} = \frac{\bar{\alpha}_M \cdot d_e}{\lambda_{\Gamma}}$ ;  $\text{Re} = \frac{w_{\phi} \cdot d_e}{\nu_{\Gamma}}$ ;  $G_{\Gamma}$  – витрата газу;  $\tau$  – тривалість процесу

теплообміну;  $m$  – маса гранульованого матеріалу в апараті.

Залежність (19) справедлива для щільного шару керамзиту і гравію та може бути використана для розрахунків середнього коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну залежно від маси завантаження теплообмінного апарату, витрати

газового середовища та тривалості теплообміну. Залежність справедлива з похибкою 14% для діапазону швидкості фільтрації  $w_{\phi} = 0,9-1,4$  м/с, температур газу на вході  $t'_r = 60-80^{\circ}\text{C}$ , еквівалентного діаметру часток  $d_e = 0,0097-0,021$  м.

Для визначення оптимальних умов теплообміну у системі, що розглядалась, проведено дослідження процесу нагрівання нерухомих гранульованих насадок, що відрізнялись розміром часток. В експериментах насадка складалась з часток однакового розміру з  $d_{e1} = 0,011$  м;  $d_{e2} = 0,018$  м;  $d_{e3} = 0,027$  м, а також складалась з суміші часток  $d_{e1} + d_{e2}$ ;  $d_{e1} + d_{e3}$ . Маса насадок для всіх дослідів була однаковою та становила  $m = 0,7$  кг. Регулятор температури гріючого повітря був встановлений на  $t'_r = 80^{\circ}\text{C}$ . Результати показали (рис. 6), що суміш часток  $d_{e1} + d_{e2}$  призводить до зростання темпу нагрівання до  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,37$ , ніж частки одного розміру

$d_{e1}$  –  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,2$ . Отже, для інтенсифікації процесів теплообміну доцільно використовувати насадку з часток різного еквівалентного діаметру.

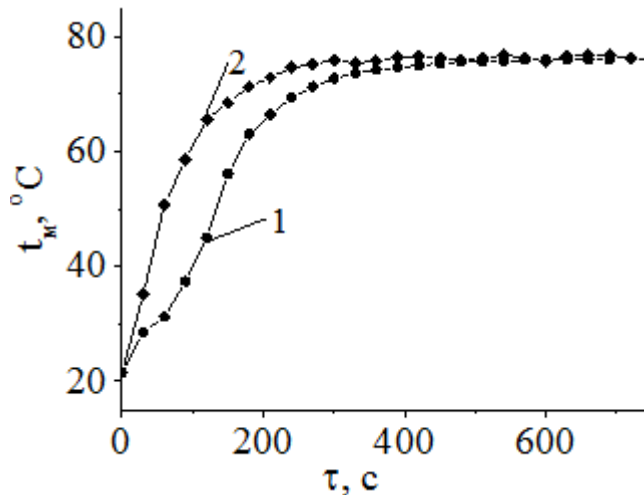


Рис. 6. Зміна температури матеріалу за часом:

1 – частки  $d_{e1}$ , м; 2 – суміш часток  $d_{e1} + d_{e2}$

Дослідження теплообміну між повітрям і щільним рухомих шаром гранульованого матеріалу для висоти шару 0,12 м проводились за середньої швидкості повітря 3,5–0,3 м/с під час дослідження керамзиту, 3,5–0,9 м/с під час дослідження гравію, швидкість руху шару матеріалу змінювалась в межах  $0,8 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-3}$  м/с. Температура навколишнього середовища змінювалась у діапазоні  $(13-20)^{\circ}\text{C}$ , температура повітря на вході встановлювалась на рівні  $60^{\circ}\text{C}$ . Характер зміни температури матеріалу залежно від швидкості фільтрації демонструє рис. 7. Збільшення швидкості фільтрації повітря сприяє інтенсифікації теплообміну, причому для швидкості  $w_{\phi} = 3,5$  м/с під час теплообміну з гравієм практично встановлювався стаціонарний режим нагрівання через 330–360 с, а значення температури матеріалу відповідало  $t \approx 55^{\circ}\text{C}$ . За використання керамзиту в якості

гранульованої насадки стаціонарний режим встановлювався протягом 80 с ( $w_{\phi} = 1,2$  м/с) і 120 с ( $w_{\phi} = 0,3$  м/с).

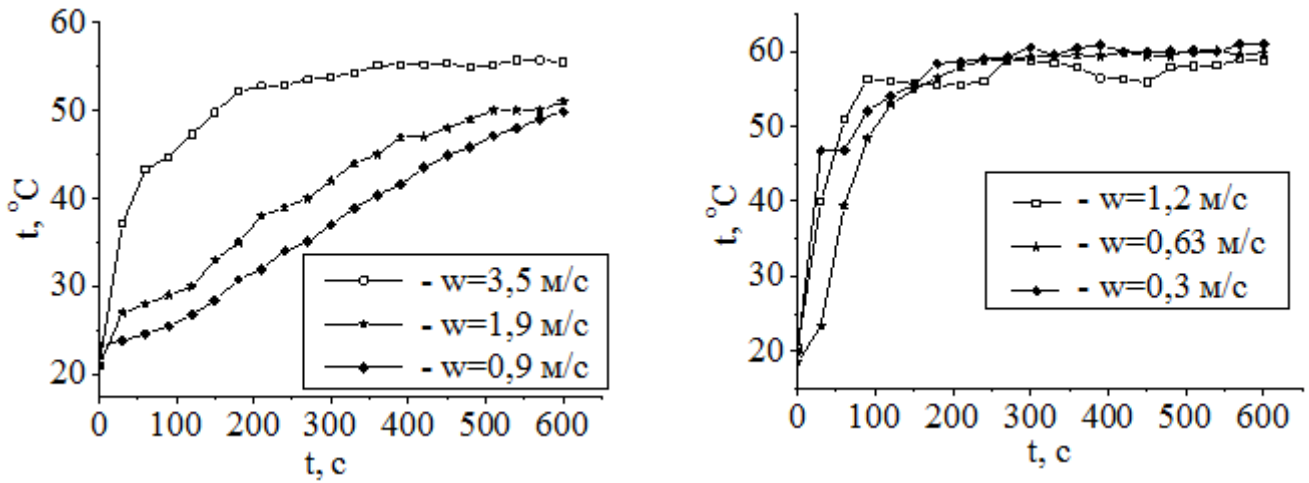


Рис. 7. Температура матеріалу на виході з робочій камери за різної швидкості фільтрації  $w_{\phi}$ :  
*a* – гравій, *б* – керамзит

Узагальнення експериментальних даних для рухомого шару дозволило отримати залежність для розрахунку середнього коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну, який в безрозмірному вигляді представлений формулою (20):

$$Nu = 1,51 \cdot Re_M^{1,56}, \quad (20)$$

де  $Nu = \frac{\bar{\alpha}_M \cdot d_e}{\lambda_r}$ ;  $Re_M = \frac{w_M \cdot d_e}{\nu_r}$ ;  $w_M$  – швидкість руху гранульованого

матеріалу;  $\lambda_r$  та  $\nu_r$  – коефіцієнт теплопровідності та кінематичної в'язкості газового компоненту, відповідно. Залежність справедлива з максимальною похибкою 24 % для діапазону швидкості фільтрації  $w_{\phi} = 1,1 - 1,4$  м/с та для діапазону швидкості матеріалу  $w_M = 1,5 \cdot 10^{-3} - 3,5 \cdot 10^{-3}$  м/с. Для рухомого шару за порівняльних швидкостей гравію та керамзиту інтенсивність нагрівання вища для керамзиту. За швидкості руху керамзиту  $w_M = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с та висоти каналу 0,4 м шар нагрівався на 36 °С, а темп нагрівання був 0,14 К/с. За швидкості руху гравію  $w_M = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м/с шар нагрівався на 23 °С, а темп нагрівання становив 0,08 К/с.

Порівняння даних, що отримані для рухомого і нерухомого шару, показало, що за інших рівних умов коефіцієнти міжкомпонентного теплообміну залежно від режимних параметрів можуть бути однакові або вищі в рухомому, ніж в нерухомому шарі. На рис. 8 представлений графік залежності коефіцієнтів для рухомого (1) і нерухомого (2) шару керамзиту.

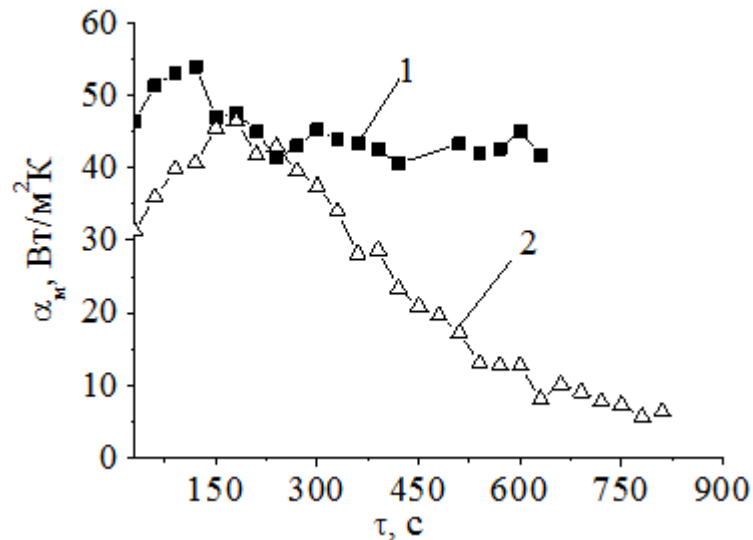


Рис. 8. Зміна середнього коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну:

1 – рухомий шар керамзиту; 2 – нерухомий шар керамзиту

Результати отримані для таких умов: вхідна температура повітря  $t'_1 = 80$  °С, середня швидкість фільтрації  $\bar{w}_\phi = 1,4$  м/с, середня швидкість шару  $\bar{w}_k = 2,8 \cdot 10^{-3}$  м/с. Лінія (1) для рухомого шару протягом усіх дослідів залишалася вище лінії (2), що свідчить про вищу інтенсивність процесу теплообміну. Для даного експерименту інтенсивність теплообміну рухомого шару в середньому в 1,4 разів вища за нерухомого. Інтенсивність нагрівання рухомого шару керамзиту за швидкості  $w_M = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с у 2,1 вища, ніж нерухомого. Інтенсивність нагрівання рухомого шару гравію за швидкості  $w_M = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м/с у 1,9 разів вища, ніж нерухомого. Зниження швидкості руху шару до  $w_M = 0,8 \cdot 10^{-4}$  м/с привело до порівнянних значень  $\bar{\alpha}_M$ , тобто інтенсивність теплообміну для рухомої та нерухомої насадки практично однакова.

На підставі аналізу результатів експериментальних та теоретичних досліджень встановлено, що в якості матеріалу для гранульованої насадки в більшості випадків доцільно використовувати керамзит, який у порівнянні з гравієм та іншими матеріалами, дані за якими отримані іншими дослідницькими групами, має високий темп нагрівання, відносно низьке значення щільності (щільність керамзиту  $\rho_k = 820 - 950$  кг/м<sup>3</sup>, щільність гравію  $\rho_{гр} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>) та доступну вартість.

У четвертому розділі представлені результати розробок теплоутилізаторів-регенераторів із щільним гранульованим шаром, рухомим та нерухомим. Відома схема регенератора з рухомим шаром показана на рис. 9. Регенеративний теплообмінник зі щільним шаром проміжного рухомого гранульованого теплоносія (насадки) розглядався для умов акумуляції низькопотенційної теплоти з характеристиками потоку, що відповідали існуючим умовам промислових

підприємств. У камері охолодження шар матеріалу охолоджувався повітрям з навколишнього середовища.

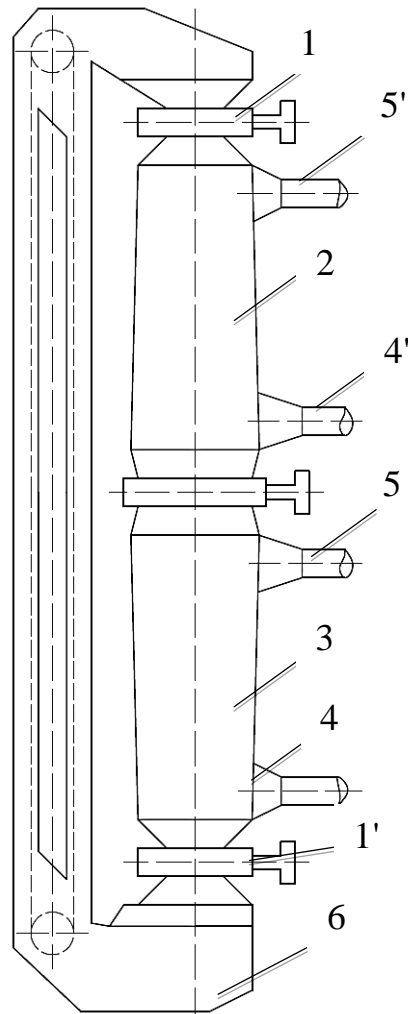


Рис. 11. Схема регенератора з рухомою гранульованою насадкою:

- 1, 1' – розподільно-ущільнюючий пристрій; 2 – камера нагрівання повітря;  
 3 – камера нагрівання насадки, 4, 4' – вхід повітря, що гріє і нагрівається;  
 5, 5' – вихід повітря, що гріє і нагрівається; 6 – система транспорту насадки

Для теплових розрахунків приймалися такі вихідні дані. Температура повітря, що нагрівалось: на вході в регенератор  $t'_2 = 20$  °С, на виході  $t''_2 = 40$  °С. Витрата продуктів згорання:  $G_1 = 0,011$  кг/с, температура продуктів згорання на вході в регенератор  $t'_1 = 80$  °С, на виході  $t''_1 = 45$  °С. Насадка уявляла собою частки керамзиту ефективним діаметром 0,02 м з порозністю шару  $\varepsilon = 0,42$ .

На підставі аналізу особливостей теплообміну між щільним нерухомим шаром гранульованого матеріалу та наскрізним потоком газу розроблена методика розрахунку теплоутилізаторів з нерухомою насадкою, в яку входить визначення коефіцієнта міжкомпонентного теплообміну за емпіричною залежністю (19). Розрахунки проведені за вихідних даних, відповідних наведеним вище для

регенератора з рухомим шаром. Порівняльна характеристика регенераторів з рухомим та нерухомим шаром наведена у табл. 4.1.

Порівняльний аналіз запропонованих у роботі регенераторів з існуючими в промисловості дозволив зробити такі висновки. Існуючі теплоутилізатори регенеративного типу загалом розраховані для утилізації теплоти котелень та виробництв з середнім рівнем теплових викидів. Тепловий ККД для них змінюється від 79 % до 38 %, причому у середньому ККД становить 55 %. Пропонований у даній роботі регенератор з рухомим щільним шаром керамзиту характеризується ККД на рівні 79 %. Регенератор з нерухомим шаром гранульованого матеріалу, розрахований при ідентичних початкових даних, має ККД 60 %, проте для його функціонування не існує потреби використання механізмів для організації руху насадки.

Таблиця 4.1

**Порівняльна характеристика регенераторів з рухомим та нерухомим шаром**

Величина	Рухомий шар		Нерухомий шар	
	Камера нагрівання	Камера охолодження	Період нагрівання	Період охолодження
Маса, кг	2,8		3,2	
Висота камери, м	0,68	0,3	0,78	
Витрата повітря, кг/с	0,011	0,018	0,011	0,018
Час, с	–	–	300	270
Витрата матеріалу, кг/с	0,017		–	
Ефективність	0,79		0,6	

Проведений розрахунок регенератора з нерухомим шаром, що призначений для обігрівання приміщення, розташованого безпосередньо поруч із вентиляційними каналами підприємства продуктивністю 400 м<sup>3</sup>/год. Температура газу на вході з витяжних пристроїв  $t'_{\text{п}} = 80$  °С, на виході  $t''_{\text{п}} = 64$  °С. Початкова температура матеріалу:  $t'_2 = 20$  °С, кінцева температура повітря на виході  $t''_2 = 68$  °С. Гранульованою насадкою є щільний шар керамзиту, еквівалентний діаметр часток  $d_e = 0,02$  м. Теплообмінна ділянка уявляла собою трубу діаметром 0,2 м і довжиною 1 м. В результаті отримані такі характеристики роботи регенератора. Маса засипання  $m = 15$  кг, час нагрівання у регенераторі становить 3 хв, час охолодження – 30 хв. Доцільно встановити дві наповнені керамзитом труби та включати їх періодично. Розрахований регенератор з нерухомою насадкою дає можливість роботи без прямого контакту часток насадки з навколишнім повітрям, що нагрівається. Представлені конструкції розраховані на низкопотенційну теплоту і можуть бути запропоновані для утилізації теплоти вихідних газів.

## ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Отримані аналітичні залежності для розрахунків температур газового та твердого компонентів дозволяють проводити оцінку впливу різних факторів, таких

як фізичні властивості газу та твердих часток, швидкості потоків, порозності шару на ефективність теплообміну, дані за якими можуть бути застосовані для визначення оптимального режиму роботи теплоутилізаторів контактного типу та визначення раціональних геометричних характеристик теплообмінника, зокрема доцільну висоту  $L$ .

2. Показано, що розраховані за отриманими аналітичними залежностями дані та експериментальні дані для температур теплоносіїв під час теплообміну між рухомим шаром гранульованого матеріалу та повітрям задовільно узгоджуються. Для шару керамзиту з частками  $d_e = 0,0097$  м за  $\bar{\alpha}_M = 36$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) розрахункові дані температур часток мають розбіжність з експериментальними на рівні 4,4% для вхідного перерізу апарату ( $x=0$  м) та 0,8% для вихідного перерізу, розбіжність для температури повітря складає 0,4%. За використання гравію в якості гранульованого матеріалу з  $d_e=0,021$  м за  $\bar{\alpha}_M=106$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) розрахункові та експериментальні дані різняться для часток на 1,2% за  $x=0$  м та на 3,4% за  $x=0,4$  м; для температури повітря – на 6,9% за  $x=0,52$  м.

3. Показано, що збільшення інтенсивності нагрівання спостерігається за збільшення швидкості фільтрації. Для швидкості  $w_\phi = 3,5$  м/с під час теплообміну з рухомим шаром гравію стаціонарний режим нагрівання практично встановлювався через 330–360 с, а значення температури матеріалу відповідало  $t \approx 55$  °С. За використання керамзиту в якості гранульованої насадки стаціонарний режим встановлювався протягом 80 с ( $w_\phi = 1,2$  м/с) і 120 с ( $w_\phi = 0,3$  м/с).

4. Дослідженнями встановлено, що інтенсивність теплообміну рухомого шару вище ніж нерухомого. Інтенсивність нагрівання рухомого шару керамзиту за швидкості  $w_M = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с у 2,1 рази вища, ніж нерухомого. Інтенсивність нагрівання рухомого шару гравію за швидкості  $w_M = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м/с у 1,9 разів вища, ніж нерухомого.

5. На підставі проведених досліджень встановлено, що для рухомого шару за порівняльних швидкостей гравію та керамзиту темп нагрівання вище для керамзиту. За швидкості руху керамзиту  $w_M = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с та висоти каналу 0,4 м шар нагрівався на 36 °С за темпу нагрівання 0,14 К/с. За швидкості руху гравію  $w_M = 1,4 \cdot 10^{-3}$  м/с шар нагрівався на 23 °С, темп нагрівання становив 0,08 К/с.

6. Дослідженнями встановлено, що для інтенсифікації процесів теплообміну доцільно використовувати насадку з часток різного розміру. Суміш часток  $d_{e1}=0,011$  м та  $d_{e2}=0,018$  м зумовлює більший темп нагрівання:  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,37$  К/с, ніж

для одного розміру: за  $d_{e1}$ :  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,2$  м; за  $d_{e2}$ :  $\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,3$ .

7. Виконані дослідження показують, що раціональною умовою роботи теплоутилізатора з щільною нерухомою насадкою є обмеження тривалості періоду нагрівання за температурою. Пропонується встановлювати кінцеву температуру нагрівання матеріалу на рівні 80 % від значення температури газу на вході.

Подальше витримування матеріалу в апараті супроводжується зниженням темпу нагрівання, що призводить до зменшення його ефективності.

8. Дослідженнями встановлено, що збільшення входної температури повітря призводить до інтенсифікації теплообміну. Збільшення температури повітря на вході в апарат з 60 °С до 80 °С призвело до збільшення темпу нагрівання керамзиту у 1,5 рази.

9. На підставі аналізу результатів досліджень встановлено, що в якості матеріалу для гранульованої насадки в більшості випадків доцільно використовувати керамзит, який у порівнянні з гравієм та іншими матеріалами, дані за якими отримані іншими дослідницькими групами, має високий темп нагрівання, відносно низьке значення щільності (щільність керамзиту  $\rho_k = 825 - 950 \text{ кг/м}^3$ , щільність гравію  $\rho_{гр} = 1930 \text{ кг/м}^3$ ) та доступну вартість.

10. Результати теплових конструкторських розрахунків за розробленими в роботі методиками показують, що запропонований теплоутилізатор-регенератор з рухомим щільним шаром керамзиту характеризується ККД на рівні 79 %. Регенератор з нерухомим шаром має ККД 60 %, проте для його функціонування не існує потреби використання механізмів для організації руху насадки.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. Solodka A., Volgusheva N., Boshkova I., Titlov A., Rozhentsev A. Investigation of heat exchange in a blown dense layer of granular materials. *East-European Journal of Enterprise Technology: Energy-saving technologies and equipment*. 2017. V.5/8(89). P. 58-64. *Особистий внесок: Дисертанту належить формулювання ідеї роботи, напрямків досліджень та аналіз розрахункових температур.*

2. Дементьєва Т. Ю., Солodka А. В. Исследование коэффициентов теплообмена неподвижного слоя с внутренними источниками теплоты. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2015. № 47(2) – С. 63-66. *Дисертанту належать розрахунки теплових ефектів, аналіз та узагальнення даних.*

3. Солodka, А. В. Изучение процессов теплопереноса в теплообменнике с гранулированной насадкой. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2017. № 2(80). – С. 116-121.

4. Бошкова І. Л., Солodka А. В. Математическое описание процесса теплообмена между потоками газа и дисперсного материала. *Холодильна техніка і технологія*. Одеса, 2017. Т. 53(2). С. 39–43. *Дисертанту належить проведення варіативних розрахунків температури матеріалу та аналіз результатів.*

5. Солodka, А. В. Исследование теплообмена в неподвижном плотном слое гранулированного материала. *Холодильна техніка і технологія*. Одеса, 2017. – Т. 53(3). С. 12–16.

6. Бошкова І. Л., Волгушева Н. В., Солодка А. В. Разработка теплообменника с неподвижной гранулированной насадкой для утилизации низкопотенциальной теплоты. *Холодильна техніка і технологія*. Одеса, 2018. – Т. 54(1). С. 23–27. *Дисертанту належить аналіз та узагальнення даних за власними експериментальними дослідженнями.*

### Публікації апробаційного характеру

1. Бошкова І. Л., Солодка А. В., Притула В. В. К вопросу утилизации выбросов тепла на промышленных предприятиях. Казахстан – Холод 2015: материалы V міжнародної науково-технічної конференції (19 лютого 2015, м. Алмати, АТУ). Алмати, 2015. С. 110–113. *Дисертанту належать: аналіз літературних джерел за темою статті, підготовка до публікації.*

2. Солодка, А. В. Рекуперативні теплообмінники з дисперсною насадкою теплотехнологічних установок. Еколого-енергетичні проблеми сучасності: матеріали XV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів (14 квітня 2015 р. м. Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2015. С. 152–154.

3. Солодка, А. В. Методики расчета контактных теплообменников с движущимся продуваемым плотным слоем. Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції (24–25 вересня 2015, м. Миколаїв, НУК ім. адмірала Макарова). Миколаїв, 2015. С. 67–73. *Дисертанту належить розробка методики розрахунку контактних теплообмінників з рухомим шаром*

4. Дементьева Т. Ю., Солодка А. В. Моделирование процессов тепломасопереноса в контактных теплообменниках с движущейся насадкой. Развитие науки в XXI веке: матеріали XI Міжнародної заочної науково-практичної конференції (14 березня 2016 р. м. Харків). Харків, 2016. С. 145–150. *Дисертанту належать розрахунки теплового стану матеріалу та аналіз даних.*

5. Солодка, А. В. Характеристики матеріалів для гранульованих насадок теплообмінника-утилізатора. Еколого-енергетичні проблеми сучасності: матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів (14 квітня 2016 р. – Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2016. С. 67–69. *Дисертанту належить визначення матеріалів, що застосовуються в якості гранульованих насадок, та проведення порівняльного аналізу.*

6. Солодка, А. В. Исследование теплообмена в системе «гранулированная насадка-воздух». Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (25-27 травня 2016 р. м. Херсон, ХНТУ). Херсон, 2016. С. 39–43.

7. Солодка, А. В. Математическое моделирование процесса теплообмена в системе «газовая среда-плотный слой дисперсного материала». Осенние научные чтения: матеріали V Міжнародної мультинаукової конференції (31 жовтня 2016 р. – Київ). Київ, 2016. Ч. 2. С. 12–15.

8. Бошкова І. Л., Солодка А. В. Исследование эффективности теплообмена в теплообменниках-утилизаторах с гранулированной насадкой. *Energy of Moldova* –

2016. Regional aspects of development: матеріали Міжнародної конференції (29 September – 01 October, 2016, Chisinau, Republic of Moldova). Chisinau, 2016. С. 373–377. *Дисертанту належать розрахунки температур насадок і наскрізного газового потоку та аналіз ефективності їх використання.*

9. Притула, В. П., Потапов М. Д., Солодка А. В. Аналитическая модель теплообмена в регенераторе с дисперсной насадкой. Казахстан-холод 2016: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (1–2 березня 2016. – м. Алмати, АТУ). Алмати, 2016. С. 111–114. *Дисертанту належить створення аналітичної моделі теплообміну в регенераторі з гранульованою насадкою, проведення розрахунків та узагальнення даних.*

10. Ряшко Г. М., Солодка А. В. Повышение эффективности системы утилизации в теплообменниках с гранулированной насадкой. Казахстан-холод 2017: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції (15–16 березня 2017, м. Алмати, АТУ). Алмати, 2017. – С. 111–114. *Дисертанту належать розрахунки теплового стану матеріалу та аналіз даних*

11. Солодка А. В., Ряшко Г. М., Бошкова І. Л., Василів В. П. Изучение теплообмена в движущемся плотном слое дисперсного материала. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, НУБіП України, 2017. С. 353–355. *Дисертанту належить складання програми розрахунків температури матеріалу та аналіз результатів.*

12. Солодка, А. В. Изучение особенностей теплообмена в движущемся плотном слое дисперсного матери. Еколого-енергетичні проблеми сучасності: матеріали XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів (14 квітня 2017 р. м. Одеса, ОНАХТ). Одеса, 2017. С. 62–64. *Дисертанту належить проведення варіативних розрахунків температури матеріалу та аналіз результатів.*

13. Солодка, А. В. Изучение теплообмена в продуваемом плотном слое гранулированных материалов. Холод в енергетиці і на транспорті, сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: матеріали конференції (17 листопада, 2017 р. Миколаїв, НУК ім. адмірала Макарова) Миколаїв, 2017. С. 20-24. *Дисертанту належить аналіз даних власного експерименту по дослідженню теплообміну в щільному шарі гранульованого матеріалу з наскрізним потоком повітря.*

14. Солодка А. В. Основы исследования теплообменника-утилизатора с дисперсной насадкой. Global Science Jurnal Publishing, Одесса, 2016 . С.16-21.

## АНОТАЦІЯ

**Солодка А.В. Інтенсифікація теплообміну в теплоутилізаторах з гранульованою насадкою. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика". – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2017.

В дисертаційній роботі на підставі аналітичних і експериментальних

досліджень визначені особливості процесу теплообміну між гранульованою насадкою, рухомою і нерухомою, та наскрізним потоком газового (повітряного) середовища та встановлені умови підвищення ефективності роботи теплоутилізаторів контактного типу. Отримані аналітичні залежності для розрахунків температур газового і твердого компонентів, які дозволяють проводити розрахунковим шляхом оцінку впливу різних факторів, таких як фізичні властивості газу і твердих часток, швидкості потоків, порозності шару на ефективність теплообміну між потоками, що може бути застосоване під час пошуку оптимальних режимних параметрів теплоутилізаторів. У проведених експериментальних дослідженнях теплообміну між щільним шаром гранульованого матеріалу і потоком нагрітого повітря в якості гранульованого матеріалу застосовувались керамзит і гравій. Хід температурних кривих для газового потоку і твердого компонентів на вході та виході установки засвідчив про наявність двох явно виражених областей з різним темпом нагрівання. Визначено, що доцільно тривалість періоду нагрівання в теплоаккумуляторах з нерухомим шаром встановлювати в межах першого періоду, який характеризується високим темпом нагрівання. Отримано, що інтенсивність теплообміну підвищується за використання суміші часток різного розміру. Встановлено, що коефіцієнти міжкомпонентного теплообміну за нагрівання нерухомої насадки залежать від швидкості газу, швидкості руху шару, температури газу на вході в апарат, тривалості процесу і описуються функцією класу сигмоїд. Встановлено, що інтенсивність теплообміну для рухомого шару в досліджуваній області вища, ніж для нерухомого. Проведені розрахунки промислових регенераторів із гранульованою насадкою з керамзиту у вигляді щільного шару. Показано, що теплоутилізатор з рухомим щільним шаром керамзиту характеризується ККД на рівні 79 %, а теплоутилізатор з нерухомим шаром гранульованого матеріалу має ККД 60 %, проте для його функціонування не існує потреби використання механізмів для організації руху насадки.

Ключові слова: теплообмін, насадка, гранульований матеріал, нагрівання, газовий потік, температурні криві, інтенсивність.

## ABSTRACT

**Solodka A.V. Intensification of heat transfer in heat-utilizing devices with granulated nozzles.** Manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

In the thesis on the basis of analytical and experimental studies, the specific features of the heat exchange process between the granular packing and the through flow of the gaseous (air) medium are determined. The area of possible application of research results is industrial enterprises with low-potential thermal emissions. As a result of solving a two-component mathematical model, analytical dependencies are obtained for calculating the temperatures of the gas and solid components in the case of a direct and countercurrent motion pattern. Dependencies make it possible to estimate the influence of various factors, such as physical properties of gas and solid particles, flow velocities, porosity of the layer,

on the efficiency of heat exchange between the flows. Calculation data is proposed to be used when searching for optimal operating parameters.

The designed experimental setup made it possible to carry out investigations both with a moving dense layer of granular material and with a stationary one. The working chamber simulated the heat exchange channel of heat recovery units and was a vertical tube of circular cross section filled with granular material. Exclay and gravel were used as the granular material. Experimental studies of heat exchange between a dense layer of granular material and a stream of heated air have been carried out. The conditions for increasing the efficiency of the heat recovery unit are established. The course of the temperature curve for the gas flow and solid components at the inlet and outlet of the installation indicates the presence of two clearly pronounced regions with different heating rates. It is assumed that it is expedient to set the heating time in the heat accumulator with a stationary nozzle within the first period, which is characterized by a high rate of heating. It is found that the heat exchange rate increases with a mixture of particles of different sizes. It is established that the coefficients of intercomponent heat transfer during heating of the fixed nozzle depend on the gas velocity, the velocity of the ball, the temperature of the gas at the inlet to the apparatus, the duration of the process, and are described by a function of the sigmoid class.

A comparative analysis of the efficiency of heat exchange between the air flow and the moving and stationary layer is carried out. It is established that in the investigated region of particle velocities the intensity of heat transfer for a moving layer is higher than for a stationary one. The analysis of calculation results of heat recovery devices with a granular packing in the form of a dense layer of expanded clay for industrial use is presented. It is shown that a heat recovery unit with a moving dense layer of expanded clay is characterized by an efficiency of 79%, a heat recovery unit with a fixed bed has an efficiency of 60%. However, the advantages of fixed-bed machines consist in the simplicity of the design and in the absence of the need to organize the movement of the nozzle.

Keywords: heat exchange, nozzle, granular material, heating, gas flow, temperature curves, efficiency.