

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

УДК 621.184.4+621.647.3

Бужинський Віктор Володимирович

ТЕПЛО- ТА МАСООБМІН В КОНТАКТНОМУ ЕКОНОМІЗАТОРІ
З РЕГУЛЯРНОЮ НАСАДКОЮ

Спеціальність 05.14.04 - Промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



00778202 (Q)

Дисертацією є рукопис
Робота виконана у Віднінському Державному технічному університеті

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор Ткаченко Станіслав
Йосипович .

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор Алабовський
Олександр Миколайович,

кандидат технічних наук,
доцент Петренко Валентин
Петрович

Провідна організація - Інститут технічної
теплотізики НАН України,
м.Київ

Захист відбудеться "4" листопада 1995р. у "14" годин
на засіданні спеціалізованої вченої ради К.01.15.03 в Українському Державному університеті харчових технологій /Україна, 252017, Київ-17, вул. Володимирська, 68/.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського Державного університету харчових технологій по вказаній адресі.

Автореферат розісланий "30" травня 1995р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради

Столоненко В.М.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ДВ - 32.620

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У вертикальних каналах різної форми при протитоковій течії газу та рідини внаслідок їх взаємного тертя утворюється двофазний потік. На умови утворення, структуру і діапазон існування різних фаз режиму двофазної протитокової взаємодії великий вплив, поряд з режимними, мають також геометричні параметри каналів - діаметр, довжина, умови входу та виходу, складність форми тощо.

При роботі технологічного обладнання режими з утворенням двофазної суміші в каналах в основному характеризуються як кризові, граничні, що обмежують видатність обладнання. Поряд з цим відзначається висока ефективність режиму двофазної протитокової взаємодії в процесах переносу теплоти та маси. Це пояснюється утворенням додаткової поверхні контакту фаз у вільному просторі каналів, однак як основний робочий такий режим практично не розглядається внаслідок нестійкості роботи та значного аеродинамічного опору. Відсутня також надійна теорія цих явищ.

У зв'язку з цим розробка нового обладнання з поліпшеними характеристиками, в якому реалізовано режим двофазної протитокової взаємодії складає актуальну науково-технічну задачу.

Мета роботи: розробка фізичної моделі і принципів одержання організованої протитокової двофазної взаємодії; обґрунтування можливості використання такого режиму в технології утилізації теплоти продуктів згоряння органічного палива; розробка методики інженерного проектування контактних економайзерів з регулярною протитоковою двофазною взаємодією.

Методи дослідження. Експериментально-теоретичні.

Наукова новизна:

- розроблені фізична модель та принципи одержання організованої - регулярної двофазної взаємодії при протитоковій течії газу та рідини;
- виявлені фази диспергованого гідродинамічного режиму підвісання рідини при протитоковій течії газу в каналах зигзагової форми при еквівалентних діаметрах каналів $d_e \geq 70 \text{ мм}$ - віяло- та вихороутворення;
- експериментально визначена залежність показника якості передачі повної теплоти та аеродинамічного опору двофазного протитокового потоку від кута гофрування зигзагового каналу,

еквівалентного діаметру каналів та відношення амплітуди гофрування до відстані між гофрованими поверхнями;

- проведено узагальнення експериментальних досліджень.

Особистим внеском дисертанта є: розробка фізичної моделі та принципів організації режиму регулярної протитокової взаємодії газу і рідини; дослідження диспергованого режиму підвисання рідини, виявлення фаз режиму; розробка методики розрахунків контактних економайзерів.

Практична цінність роботи складається з того, що на підставі результатів теоретичних та експериментальних досліджень:

- обґрунтована та перевірена в дослідно-промислових умовах можливість використання режиму підвисання рідини при протитоковій течії рідини та газу;

- одержані залежності для розрахунку меж гідродинамічних режимів з урахуванням кута гофрування зигзагового каналу;

- одержані залежності для розрахунку аеродинамічного опору та показника якості передачі повної теплоти в умовах регулярної двофазної протитокової взаємодії, які враховують вплив кута гофрування зигзагового каналу;

- розроблена методика інженерного проектування контактних економайзерів з регулярною насадкою, розроблений ряд типорозмірів апаратів.

Реалізація результатів роботи. За запропонованою методикою проектування розроблені та впроваджені у виробництво контактні економайзери з регулярною насадкою: на Хмельницькому заводі "Темп" номінальної потужністю $Q=2$ Гкал/год; на Вінницькому заводі ЗБК - $Q=0.6$ Гкал/год. Результати досліджень використовуються в учбовому процесі. За темою дисертації виконані три госпрозрахункових та одна держбюджетна науково-дослідна робота, в яких дисертант був відповідальним виконавцем.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на Другій Всесоюзній конференції "Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации", Рига, 1988 г., на Восьмій Всесоюзній конференції "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах", Ленінград, 1990 г., на Республіканській науково-технічній конференції "Проблеми и опыт охраны окружающей среды в республике", Київ, 1990 г.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображені у 7

друкованих працях (1 стаття у науково-технічному журналі, 3 авторських свідчення та 3 публікації тезисів доповідей на науково-технічних семінарах та конференціях).

Структура та розмір роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти глав, висновку та переліку літератури, основний її текст викладено на 98 машинописних сторінках, ілюстровано 13 рисунками, 7 таблицями та 4 додатками. Список цитованої літератури містить 98 назв.

ГОЛОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність роботи, розглянуто основне сучасне обладнання, яке використовується в технології утилізації теплоти контактним способом, а також традиційний підхід при проектуванні відповідних контактних апаратів - економайзерів.

Перша частина присвячена огляду літератури з питань гідродинаміки протитокового руху газу і рідини у вертикальних каналах різної форми. Особливу увагу при цьому приділено впливу геометричного виконання каналів (умов входу в канал, довжини, складності каналів та їх діаметра) на утворення і структуру двофазної суміші, початок підвисання рідини (початок захлинання). Проаналізовані основні підходи до опису меж гідродинамічних режимів при двофазній протитоковій взаємодії газу та рідини. Вирішальними факторами на початок підвисання рідини, перекидання потоку є геометричні та режимні параметри. На підставі аналітичного огляду з'ясовані такі напрямки і задачі даної роботи:

- виявити передумови, сформуувати фізичну модель і принципи одержання організованої протитокової двофазної взаємодії;
- розробити експериментальний стенд і методику проведення досліджень;
- дослідити вплив геометрії каналів на умови утворення та структуру двофазного потоку при протитоковій течії газу і рідини, межі гідродинамічних режимів;
- дослідити гідродинаміку і тепломасообмін стосовно технології утилізації теплоти продуктів згоряння органічного палива;
- одержати залежності для розрахунку показників передачі теплоти і маси, аеродинамічного опору;
- розробити методику інженерного проектування контактних

апаратів з організованою протитоковою двофазною взаємодією, перевірити їх в промислових умовах.

У другій частині розглянуті основні передумови, що сприяли досягненню поставленої мети. Аналіз робіт з протитоковими двофазними потоками у каналах різної форми дав змогу виявити такі закономірності: допустимі за умовами початку заглинання швидкості газової фази тим нижче, чим складніша геометрія каналів та менша степінь упорядкованості їх структури; при зменшенні вільного перерізу насадок ($d_e \rightarrow 0$), збільшенні питомої поверхні ($F_v = F/\Omega \rightarrow \max$, де F - площа поверхні, Ω - об'єм насадки) зростає вплив стінок каналів на утворення (швидкості початку підвищення зменшуються) і структуру двофазної суміші; існує певний діапазон навантажень з газової фази від початку підвищення рідини до порушення протитоку.

Основною формою каналу для досліджень обрано зигзаговий канал. При цьому прийнято до уваги, що змінюванням співвідношення геометричних параметрів таких каналів можна здійснити необхідну складність геометрії, разом з тим насадки з зигзаговими каналами достатньо технологічні у виготовленні.

В другій частині приведено також опис експериментальної установки, на якій провадились дослідження та методика досліджень. Схема установки показана на Рис.1. Парогазова суміш утворювалась шляхом змішування повітря з водяною паром з парогенератора 1 в змішувачі 2. Насичена пароповітряна суміш подавалась у дослідну колонку з насадкою 3 з розмірами в перерізі 100×210 мм. Одна з граней колонки розмірами 1400×210 мм була виконана з оргскла і надавала можливість візуально спостерігати поздовжній переріз каналів. Відділення крапельної вологи проводилося у жалюзійному сепараторі 4. Відділена волога поверталась знову на зрошення насадки. Основний потік води на зрошення насадки подавався зрошувачем 5. Відведення нагрітої води і конденсату із змішувача провадилося через гідрозатвори 6 і 7. З допомогою насоса 8 і системи вентилів регулювалась температура води, яка подавалась на зрошення. Здійснювався контроль таких параметрів: витрати повітря з допомогою сопла 9 і дифманометрів 10; витрати води з допомогою ротаметра 11; опір насадки та всієї колонки - дифманометрами 12; контроль теплоності на вході та виході термомпарами 13.

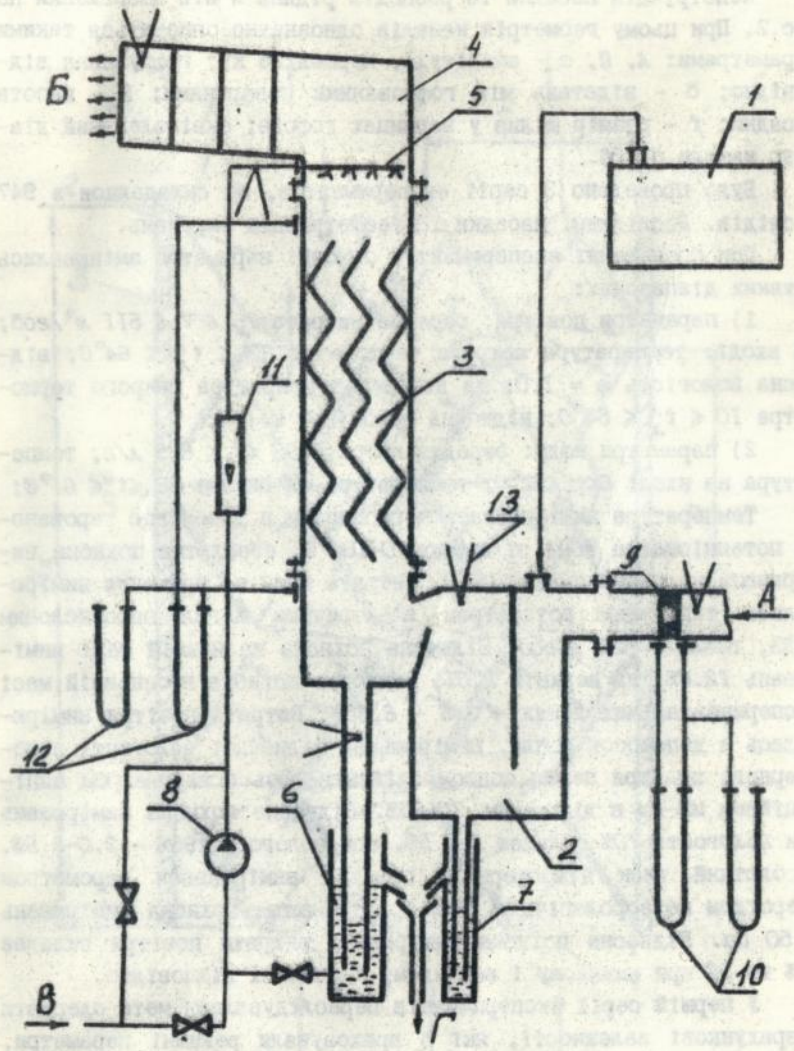


Рис.1. Принципова схема дослідного стенду

Конструкція насадки та розподіл рідини в ній зображений на Рис.2. При цьому геометрія каналів однозначно описується такими параметрами: A , Π , α - амплітуда, період та кут гофрування відповідно; δ - відстань між гофрованими поверхнями; H_K - висота насадки; f - розмір щілин у вершинах гофрів; еквівалентний діаметр каналу $d_e = 2\delta$.

Було проведено 3 серії експериментів, що склалися з 947 дослідів. Досліджені насадки 16 геометричних виконань.

При проведенні експериментів основні параметри змінювались у таких діапазонах:

1) параметри повітря: середня витрата $75 \leq V \leq 511 \text{ м}^3/\text{год}$; на вході: температура мокрого термометра $32 \leq t'_m \leq 64^\circ\text{C}$; відносна вологість $\varphi = 1.0$; на виході: температура мокрого термометра $10 \leq t''_m \leq 54^\circ\text{C}$; відносна вологість $\varphi = 1.0$;

2) параметри води: середня витрата $93 \leq V_p \leq 695 \text{ л/с}$; температура на вході $6 \leq t'_p \leq 22^\circ\text{C}$; температура на виході $18 \leq t''_p \leq 61^\circ\text{C}$;

Температура вимірювалась термопарами з допомогою тарованого потенціометра КСП4 зі шкалою $0-100^\circ\text{C}$, абсолютна похибка вимірювань не перебільшує 0.5°C . Витрата води на зрошення вимірювалась тарованим ротаметром електричним загальнопромисловим КСДЗ, шкала $0-630 \text{ л/год}$. Відносна похибка на нижній межі вимірювань 12.6% , на верхній 2.5% . Відносна похибка в основній частині експериментальних даних - $3.6 - 6.25\%$. Витрата повітря вимірювалась з допомогою сопла. Вимірювання відносної вологості атмосферного повітря перед соплом здійснювалось психрометром аспіраційним МВ-4М в діапазоні $70-95\%$. Відносна похибка вимірювань при вологості 70% складає $2-3.5\%$, при вологості 95% - $2.0-2.5\%$. Абсолютний тиск атмосферного повітря вимірювався барометром анероїдом метеорологічним БАММ-1. Абсолютна похибка вимірювань - 50 Па . Відносна похибка вимірювань витрати повітря складає 11% та 5% при нижньому і верхньому значеннях відповідно.

У першій серії експериментів переслідувалася мета одержати розрахункові залежності, які б враховували режимні параметри, перевірити якість самих залежностей. Досліджено процес конденсації з насиченої пароповітряної суміші, бо саме ця стадія є найбільш лімітуючою в технології утилізації теплоти димових газів. Експерименти проводилися при сталій висоті каналів $H_K = 1020 \text{ мм}$ на насадці НІ при широкій зміні режимних параметрів. Геомет-

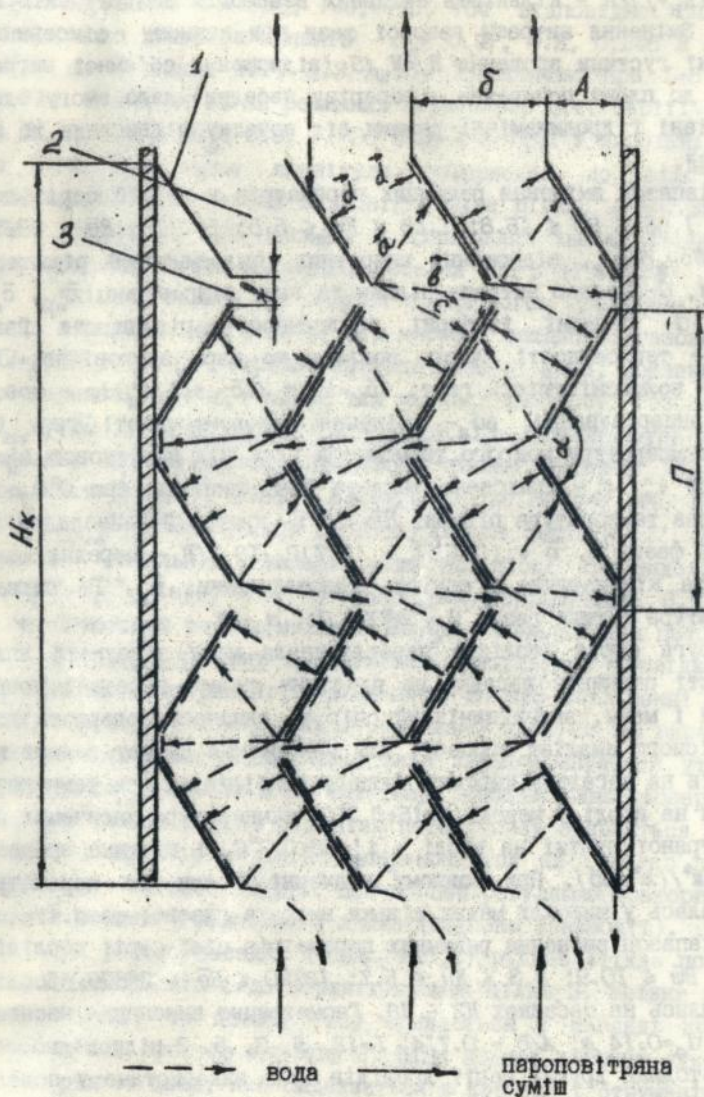


Рис.2. Фрагмент дослідної колонки з насадкою

ричні параметри насадки Н1: $\alpha=90^\circ$, $d_g=0.14$ м, $A/\delta=0.714$, $L=17$, де $L=2(H_K+f)/\Pi$ - кількість активних взаємодій або ступенів насадки. Змінення витрати газової фази при кожному фіксованому значенні густини зрошення $H_w=V_w/S$ (відношення об'ємної витрати рідини до площі поперечного перерізу насадки) дало змогу одержати різні гідродинамічні режими від початку підвисання до заглинання.

Діапазон змінення режимних параметрів у першій серії дослідів: $1.85 \leq \overline{W} \leq 16.8$; $1.58 \leq \overline{Ku}_m \leq 5.5$; $14670 \leq \overline{Re} \leq 23670$, де $\overline{W}=\overline{W}_G/\overline{G}_G$, відношення витратних теплоемностей рідини та газу, \overline{W} , \overline{G} - масова витрата рідини та газу відповідно, \overline{c}_{pP} , $\overline{c}_{pG}=c_{pP}+c_{pN} \cdot \overline{d}$ - середні ізобарні теплоемності рідини та газу, c_{pP} , c_{pN} - теплоемності сухого повітря та пари відповідно, \overline{d} - середня вологомісткість газу; $\overline{Ku}_m=\Delta d_m r_o/[\overline{c}_{pG}(t'_m-t'_p)]$, - коефіцієнт випаровування, Δd_m - змінення вологомісткості газу при зміні температури мокрого термометра газу від початкової t'_p до кінцевої t'_m , r_o - прихована теплота пароутворення при 0°C , t'_p - початкова температура рідини; $\overline{Re}=d_g \overline{u}/\nu$ - критерій Рейнольдса для газової фази, \overline{u} , $\nu = (0.101\overline{t}_m + 13.7)P_o \cdot 10^{-6}/P$ - середні швидкість та кінематична в'язкість газової фази, \overline{t}_m , P - середні температура і тиск газу, $P_o=98000$ Па; $d_g=2\delta$.

Друга серія дослідів переслідувала мету з'ясувати вплив кількості ступенів насадки на показник якості передачі повної теплоти і маси, аеродинамічний опір та одночасно одержати дані для якісного аналізу процесу. Для виключення впливу деяких параметрів на загальну картину процесу стабілізувалась температура води на вході у межах $t'_p=15 \pm 0.3^\circ\text{C}$, температура насиченої пароповітряної суміші на вході - $t'_m=50 \pm 0.3^\circ\text{C}$, і густина зрошення $H_w=17 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ год})$. При кожному значенні L при цих параметрах змінювалась у широких межах тільки витрата газової фази.

Діапазон змінення режимних параметрів цієї серії дослідів: $4.71 \leq \overline{W} \leq 10.9$; $2.3 \leq \overline{Ku}_m \leq 5.7$; $12720 \leq \overline{Re} \leq 28800$. Досліди проводились на насадках Н2 - Н6. Геометричне виконання насадок: $\alpha=90^\circ$; $d_g=0.14$ м; $A/\delta=0.714$; $L=12, 9, 7, 5, 3$ відповідно.

Методика другої серії дослідів була використана у подальшому при проведенні експериментів третьої серії, які призначалися для вивчення впливу кута гофрування та еквівалентного діаметра каналів на насадках Н7-Н16. Для цього при постійних зна-

ченнях $L=5$, $d_e=0.14$ м і $A/\delta = 0.714$ в насадках Н7-Н10 змінювали кут гофрування $\alpha = 130^\circ, 140^\circ, 116^\circ, 104^\circ$ відповідно. Вплив еквівалентного діаметра каналів - $d_e = 0.07, 0.2, 0.248$ м - досліджено на насадках Н11, Н13 і Н14 відповідно при $L=5$ і $A/\delta \approx 0.714$. Діапазон зміни режимних параметрів цієї серії: $2.55 \leq \text{Bv} \leq 11.4$; $1.7 \leq \text{Ku}_m \leq 3.6$; $11730 \leq \text{Re}^- \leq 58720$. У насадках Н12, Н15 і Н16 відношення амплітуди гофрування до відстані між гофрованими поверхнями відповідно були рівні: $A/\delta=0.357, 0.58, 0.62$. Порівнювались насадки з однаковими іншими геометричними параметрами, тобто показники насадки Н12 з Н7 і т.п.

Якісний аналіз проводився з допомогою графічних залежностей: аеродинамічного опору від масової швидкості газової фази - $\Delta h = f(\bar{\rho}_u)$, де $\bar{\rho}$ - середня густина газової фази; показника якості передачі повної теплоти від масової швидкості газової фази - $E_{\text{КМ}} = f(\bar{\rho}_u)$, де $E_{\text{КМ}} = (t_p'' - t_m'') / (t_p' - t_p')$, t_p'' - температура рідини на виході; висоти одиниці переносу повної теплоти від масової швидкості газової фази - $\text{Волт} = f(\bar{\rho}_u)$, де $\text{Волт} = H_K / Nt$, $Nt = (I' - I'') / \Delta T_{\text{с.л}}$ - число одиниць переносу повної теплоти, I', I'' - відповідно ентальпії газової фази на вході та виході, $\Delta T_{\text{с.л}} = (\theta_t^{\text{max}} - \theta_t^{\text{min}}) / \ln(\theta_t^{\text{max}} / \theta_t^{\text{min}})$ - середньологарифмічний, θ_t^{max} і θ_t^{min} - максимальний та мінімальний напори ентальпій між потоками.

У третій частині представлені результати досліджень. При проведенні експериментів визначено, що при збільшенні відстані між гофрованими поверхнями δ приблизно до 30-35 мм виразно простежується режим підвисання, який характеризується утворенням крапель та струменів в об'ємі газу, який названо диспергованим. У цьому режимі рідина під дією потоку газу зривається з вершин гофрів у простір каналів і переноситься на сусідню поверхню, здійснюючи зигзаговий рух. Цей процес регулярно повторюється на кожній вершині гофрованого листа (ступеню взаємодії).

При роботі насадки (див. Рис.2) рідина стікає поверхнями гофрованих листів 1 до верхніх кромek щілин 3, звідки під дією сили інерції та потоку газу зривається у вигляді крапель і струменів у простір каналів 2. Біля кожної вершини утворюється віяло рідкої фази, яке складається з крапель і струменів, а також вихор, що утворюється за вершиною за ходом газу. Основна маса рідини переноситься у віялі, обмеженом векторами \vec{A} і \vec{B} . При цьому можна визначити такі потоки рідкої фази: 1 - у нап-

рямку вектора \vec{a} , тобто на нижні площини гофрів протилежного листа, вище щілин; 2 - у напрямку вектора \vec{b} - через щілини; 3 - у напрямку вектора \vec{c} - на верхні площини гофрів протилежного листа, нижче щілин; 4 - у напрямку вектора \vec{d} - рідина, відсепарована з вихора.

Вся рідина, яка поступає на нижні поверхні гофрів у напрямку вектора \vec{a} , стікає до верхніх кромek щілин і надходить у сусідній канал, тобто бере участь у поперечному перемішуванні. Рідина, яка переноситься у напрямку вектора \vec{b} надходить у сусідній канал безпосередньо через щілини в сусідньому листі і також бере участь у поперечному перемішуванні. Рідина, яка переноситься на сусідній лист в зону, розташовану нижче щілин, тобто у напрямку вектора \vec{c} , не бере участь у поперечному перемішуванні рідкої фази, але наявність цієї частини рідини необхідна у загальному випадку для здійснення протитоку. Існує ще один потік - на верхні ступені взаємодії (краплевиніс), але він не є основним у робочому діапазоні насадки.

Розташування віял відносно вершин гофрів, а також кут їх розкриття залежить від співвідношення витрат газової та рідкої фаз. При зменшенні швидкості газової фази результуючий вектор віяла рідини зміщується донизу, при збільшенні - доверху. Перший гідродинамічний режим від початку підвисяння до симетричного розкриття віяла відносно вершини гофру (при горизонтальному розташуванні результуючого вектора віяла) названо режимом віялоутворення. У цьому режимі не відбувається накопичення рідини у насадці, відсутній також видимий краплевиніс. При збільшенні швидкості газової фази результуючий вектор віяла рідини зміщується доверху. В цьому режимі посилюється вихоруотворення, відбувається накопичення рідини у насадці, посилюється краплевиніс, різко зростає аеродинамічний опір. Цей режим названо режимом вихоруотворення. Режим віялоутворення визнано найбільш сприятливим для технології утилізації теплоти димових газів.

Якісний аналіз з допомогою залежностей $\Delta H = f(\bar{\rho}u)$, $E_{KLM} = f(\bar{\rho}u)$, $WOPt = f(\bar{\rho}u)$ дав змогу виявити такі особливості процесу:

- при збільшенні кількості ступенів насадки покращується показник якості передачі повної теплоти, але при цьому збільшується аеродинамічний опір;
- при збільшенні кута гофрування збільшується діапазон іс-

нування диспергованого режиму підвисання. Це стосується обох фаз процесу - віяло- та вихороутворення. Абсолютні значення швидкостей газової фази, відповідні межах режимів, при цьому збільшуються;

- при збільшенні кута гофрування при одних і тих же швидкостях газу суттєво погіршується показник якості передачі повної теплоти. Значення цього показника, відповідні межі режимів вихороутворення та захлинення, знижуються незначно;

- в умовах подібного перетворення геометрії зигзагового каналу збільшення кута гофрування приводить до збільшення висоти одиниці переносу повної теплоти;

- збільшення еквівалентного діаметру у подібному перетворенні зигзагового каналу призводить до зменшення аеродинамічного опору, розширюється діапазон існування диспергованого режиму підвисання;

- виродження зигзаговості каналу ($A/d_e \rightarrow 0$) призводить до порушення регулярності двофазного потоку, при цьому збільшення краплєвиноса відповідає меншим приведеним швидкостям газової фази, питомий аеродинамічний опір знижується, знижується показник якості передачі повної теплоти.

На Рис.3 наведена діаграма режимів зигзагового каналу при $d_e=0.14$ м, $A/\delta = 0.714$, $L=5$ у координатах $K\bar{u}=f(\alpha)$. $K\bar{u} = \bar{u} \sqrt{\bar{\rho}_2 / \sqrt{g\bar{\sigma}(\bar{\rho}_p - \bar{\rho}_2)}}$ - критерій Кутателадзе для газу, g прискорення вільного падіння, $\bar{\sigma}$ - коефіцієнт поверхневого натягу. Зона А відповідає режиму віялоутворення, діапазон існування якого зі збільшенням кута гофрування зростає, зона Б відповідає режиму вихороутворення, зона В - захлинення.

У четвертій частині проведено узагальнення результатів досліджень. Здійснений у частині 3 якісний аналіз характеристик процесу дозволив сформулювати принципи організації регулярної двофазної протитокової взаємодії:

- геометрія каналів повинна бути складною, а структура регулярною;

- вплив стінок каналів на умови утворення двофазного потоку повинен бути знижений для того, щоб сдержати у вигляді суцільної газової фази;

- необхідно забезпечити надійний зрив рідкої фази зі стінок каналів;

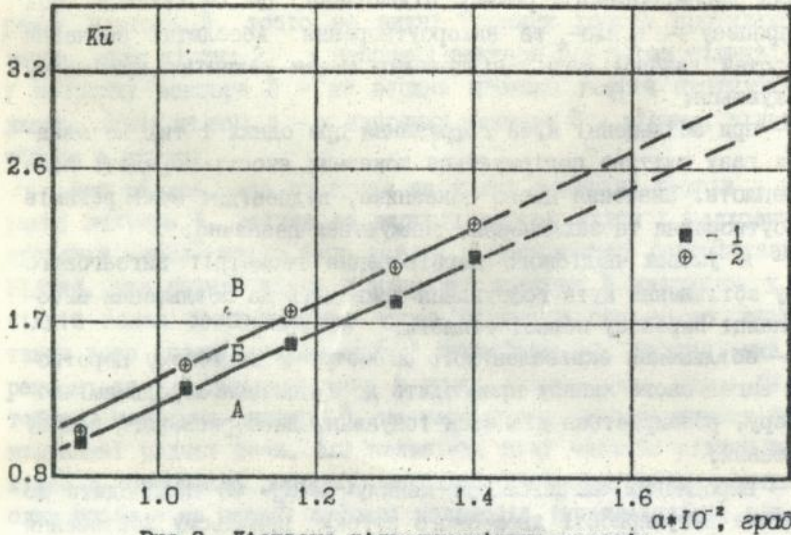


Рис.3. Діаграма гідродинамічних режимів.

1 - межа режимів віяло- і вихорутворення;

2 - межа режимів вихорутворення і захлинання.

- необхідно забезпечити локальну сепарацію крапель із зон утворення двофазної суміші;

- необхідно організувати поперечне перемішування фаз.

Крім того стало очевидним, що для виявлення оптимального геометричного виконання насадки необхідні більш об'єктивні показники, ніж якісні залежності, тобто необхідна оптимізація геометрії зигзагового каналу. Оптимізацію проведено з допомогою вагової функції:

$$Po = a_1 \frac{E_{KM}^{max} - E_{KM}}{\Delta E_{KM}} - a_2 \frac{H^{min} - H}{\Delta H} - a_3 \frac{VOPl^{min} - VOPl}{\Delta VOPl} + a_4 \frac{(\bar{\rho}u)^{max} - \bar{\rho}u}{\Delta(\bar{\rho}u)}, \quad (1)$$

де $|a_1| + |a_2| + |a_3| + |a_4| = I$ - сума вагових коефіцієнтів;

$\Delta E_{KM} = E_{KM}^{max} - E_{KM}^{min}$, $\Delta H = H^{max} - H^{min}$, $\Delta VOPl = VOPl^{max} - VOPl^{min}$,
 $\Delta(\bar{\rho}u) = (\bar{\rho}u)^{max} - (\bar{\rho}u)^{min}$.

У цьому рівнянні перша складова правої частини призначена для порівняння показників якості передачі повної теплоти, друга враховує втрати напору на подолання аеродинамічного опору. Третя складова - для порівняння габаритних розмірів насадок по висоті, тобто ефективності конструкції, четверта - для

порівняння, з одного боку, питомої тепловидатності, з другого боку - ефективності конструкції, тобто габаритних розмірів насадок у перерізі. По рівнянню (1), при $\alpha=0.25$ був оброблений масив даних, що включав параметри насадок 15 геометричних виконань (крім $H1$, в якій на виходні показники сильний вплив здійснюють початкові параметри та змінення густини зрошення).

Аналіз результатів оптимізації дозволяє зробити такі висновки: ефективність тепломасообмінних процесів у насадках підвищується зі збільшенням кута гофрування α до відомої межі, подальше збільшення α призводить до зниження ефективності; в умовах подібного перетворення геометрії зигзагового каналу змінення d_e не впливає на ефективність регулярної двофазної взаємодії; запропонована методика дає змогу, приймаючи значення вагових коефіцієнтів, прогнозувати оптимальну насадку для конкретних умов або з'ясувати напрямок подальшого пошуку.

Межа режимів віяло- та вихороутворення розраховується по такій залежності:

$$\bar{K}u_{zp} = -0.849 + 0.02035\alpha. \quad (2)$$

Межу режимів вихороутворення і захлинання (початок захлинання) можна розрахувати по формулі:

$$\bar{K}u_{np} = -0.935 + 0.02253\alpha. \quad (3)$$

Значення $\bar{K}u_{zp}$ і $\bar{K}u_{np}$ розраховані по середнім значенням параметрів. Розрахунок критерія Кутателадзе для кута гофрування $\alpha = 180^\circ$ по формулі (3) дає значення $\bar{K}u = 3.12$. Цей результат на 2.5% відрізняється від відомого $\bar{K}u = 3.2$ для перекидання потоку у вертикальних трубах по даним Соркіна. Теж саме показує екстраполяція відповідної залежності на Рис.3 (показано пунктиром).

Для статистичної обробки були відібрані результати експериментів 1,2 і частково 3-й серій, які одержані на насадках $H1-H10$, з включенням даних, здобутих на насадці $H8$ ($\alpha=130^\circ$), яка була визнана оптимальною для умов розрахунку по формулі (1), тобто при $\alpha=0.25$. Дослідження впливу параметрів L та α на інтенсивність тепломасообміну та аеродинамічний опір у режимі віялоутворення дають для зигзагового каналу такі розрахункові залежності:

а) для показника якості передачі повної теплоти:

$$E_{ж} = 1.412 - 0.439\bar{R}\bar{e}^* + 0.036\bar{W} - 0.072\bar{K}u - 0.033L + 0.0021\alpha, \quad (4)$$

де $E_{ж} = 1 - E_{к.ж}$; $\bar{R}\bar{e}^* = \bar{R}\bar{e}/\bar{R}\bar{e}_{zp}$; $\bar{R}\bar{e}_{zp} = -14424 + 412.15\alpha$.

Залежності дійсні у діапазоні параметрів: $0.39 \leq \bar{R}\bar{e}^* \leq 1.0$;

4.59 $\leq \overline{B\bar{u}} \leq 16.81$; 2.35 $\leq \overline{K\bar{u}} \leq 5.49$; 5 $\leq L \leq 17$; $90^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ$, $A/\delta = 0.714$, $d_g = 0.14$ м. 93% дослідів відповідають погрішності $\leq 10\%$;

6) Для аеродинамічного опору:

$$\overline{B\bar{u}} = 3.4 \cdot 10^7 (\overline{Re}^*)^{-0.699} \cdot \overline{B\bar{u}}^{-0.078} \cdot \overline{K\bar{u}}^{0.13} \cdot L^{1.027} \cdot \alpha^{-3.5} \quad (5)$$

Залежності дійсні у діапазоні параметрів: $0.39 \leq \overline{Re}^* \leq 1.0$; $3.28 \leq \overline{B\bar{u}} \leq 16.81$; $2.35 \leq \overline{K\bar{u}} \leq 5.49$; $5 \leq L \leq 17$; $90^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ$, $A/\delta = 0.714$, $d_g = 0.14$ м. 82% дослідів відповідають погрішності $\leq 10\%$.

У п'ятій частині викладені результати практичної реалізації результатів досліджень. Було випробувано два контактних економайзера з регулярною насадкою. На одному з них, що встановлений на Хмельницькому заводі "Темп" з параметрами: $Q=2$ Гкал/год, $\alpha=90^\circ$, $d_e=140$ мм, $A/\delta = 0.714$, $L=17$, поперечним перерізом $S = 3.05$ м² та питомою поверхнею насадки $F_v = 28$ м²/м³, внаслідок недостатньої потужності споживачів вдалося досягти тільки $Q = 0.9$ Гкал/год при аеродинамічному опорі апарату $\Delta H = 100$ Па, питомій тепловидатності $q_v = 342$ кВт/м³ та швидкості газу в апараті $\bar{u} = 1.8-1.9$ м/с. В порівнянні з контактними апаратами з кільцями Рашига типу ЕКБ: $Q=1$ Гкал/год, $q_v = 308$ кВт/м³, $\Delta H = 600$ Па, $F_v = 100$ м²/м³, $\bar{u} = 2.0-2.5$ м/с, було досягнуто значного зменшення аеродинамічного опору (у 6 разів) та питомої поверхні насадки (у 4 рази).

Другий апарат було встановлено на Вінницькому заводі ЗБК. Параметри конструкції та результати випробувань: $Q = 0.55-0.6$ Гкал/год, $\alpha=130^\circ$, $d_e=140$ мм, $A/\delta = 0.714$, $L=18$, $S=0.725$ м², $F_v = 25$ м²/м³, $q_v = 405-460$ м²/м³, $\bar{u} \approx 4.5$ м/с, $\Delta H = 500 - 600$ Па. Цей апарат вже більше трьох років знаходиться у промисловій експлуатації. В порівнянні з апаратами з кільцями Рашига у 2.0 - 2.5 рази знижені габарити, в основному за рахунок поперечного перерізу, і у 3 - 3.3 рази матеріаломісткість.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розроблена фізична модель та принципи одержання організованого - регулярного двофазного потоку, який названо диспергованим режимом підвисання, обґрунтовані можливості практичного використання такого режиму в технології утилізації теплоти продуктів згоряння органічного палива.

2. Досліджено процес контактної протитокової конденсації пари з насиченої пароповітряної суміші у зигзагових каналах при

$d_e \geq 35-40$ мм відповідно технології утилізації теплоти продуктів згоряння органічного палива.

3. Виявлено суттєвий вплив геометрії каналів на утворення, існування та критичні переходи двофазного потоку. Геометричні параметри змінювались в таких межах: кут гофрування - $90^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ$; еквівалентний діаметр каналів - $0.07 \leq d_e \leq 0,248$ м; відношення амплітуди гофрування до відстані між гофрованими поверхнями - $0.357 \leq A/\delta \leq 0.72$; кількість ступенів насадки - $3 \leq L \leq 17$. При зменшенні d_e підвищується вплив стінок каналів, при цьому збільшується аеродинамічний опір, зменшується діапазон існування диспергованого режиму підвисання. Зменшення відношення амплітуди гофрування до відстані між гофрованими поверхнями (A/δ) приводить до виродження зигзаговості каналу, внаслідок цього виникає порушення регулярності двофазної структури, що характеризується зниженням ефективності. Збільшення кута гофрування при сталих значеннях A/δ і d_e приводить до зменшення аеродинамічного опору, розширюється також діапазон існування диспергованого режиму підвисання.

4. Виявлено дві фази диспергованого режиму підвисання - віяло- та вихороутворення, прийнято, що для технології утилізації теплоти продуктів згоряння найбільш сприятливим є режим віялоутворення. Встановлені межі режимів при переході від віяло- до вихороутворення і далі до режиму заглинення, одержані залежності для розрахунку меж режимів.

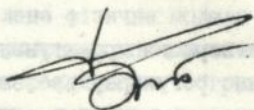
5. Розроблена методика оптимізації зигзагового каналу, яка дозволяє стосовно технології утилізації теплоти димових газів або з'ясувати оптимальну геометрію або виявити напрямок подальшого пошуку;

6. Одержані залежності для розрахунку тепломасообміну та аеродинамічного опору, які враховують, крім режимних параметрів, кут гофрування та кількість активних взаємодій газу і рідини.

7. Розроблена методика інженерного проектування контактних економайзерів, в яких реалізовано регулярну двофазну протитоківу взаємодію. Випробування цього устаткування в умовах дослідно-промислового виробництва показали його перевагу у порівнянні з відомими апаратами. Розроблений ряд типорозмірів контактних економайзерів з регулярною двофазною структурою.

ГОЛОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Бужинський В.В., Ткаченко С.И., Руденко І.В. Тепломасообмін і гідродинаміка в каналах зигзагової форми при протитоці газу і рідини. Вінниця.: Вісник ВДТУ. 1994. С.23-31.
2. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Пинчук Ю.К., Корженко Е.С., Святенко Н.И. А.С.СССР №1560304 В ОI J 19/30, Регулярная насадка., опубл. 04.1990 г., БИ №16;
3. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Пинчук Ю.К., Корженко Е.С., Коливашко Н.И. А.С.СССР №1607906 В ОI J 19/30, Регулярная насадка для тепломасообменных аппаратов., опубл. 11.1990 г., БИ №43.
4. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Коливашко Н.И., Пинчук Ю.К. А.С.СССР №1638527 F28D 9/00. Тепломасообменный аппарат. Опубл. 03.91 г., БИ №12 1991 г.
5. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Пинчук Ю.К. Конденсация из парогазового потока в каналах зигзагообразной формы в режиме диспергирования газовой фазы. - Тезисы докладов Второй Всесоюзной конференции "Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации", Рига, 1988 г.С.29-30.
6. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Пинчук Ю.К. Гидродинамика и тепломасообмен в двухфазном потоке в каналах зигзагообразной формы. - Тезисы докладов Восьмой Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах", Ленинград, 1990 г., С.358-360.
7. Бужинский В.В., Ткаченко С.И., Пинчук Ю.К., Руденко И.В., Коливашко А.И. Энерго- и природосбережение при утилизации теплоты дымовых газов котельных. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции "Проблемы и опыт охраны окружающей среды в республике", Киев, 1990 г., С.3-5.



АННОТАЦІЯ

Бужинский В.В. Тепло- и массообмен в контактном экономайзере с регулярной насадкой, рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика. Украинский Государственный университет пищевых технологий, Киев, 1995.

В диссертации рассмотрены вопросы снижения габаритов и повышения эффективности контактных экономайзеров. Проведены экспериментальные исследования процесса конденсации пара из насыщенной паровоздушной смеси в зигзагообразных каналах в условиях организованного противоточного двухфазного взаимодействия. На основании проведенных работ в 2.0-2.5 раза уменьшены габариты, в 3.0-3.3-материалоемкость экономайзеров.

THE ABSTRACT

Buzhinsky V.V. Heat exchange and mass transfer in the contact economizer with a regular nozzle.

Thesis are submitted for candidate of technical science, speciality 05.14.04 - Heat power industry. Ukraine State University of food production processes, Kyiv, 1995.

The problems of gabarit reduction and increate of the contact ekonomizer efficiency are discussed in the thesis. There was carried out the experimental investigation of steam condensation process of saturated steam-air mixture in zigzag passages under conditions of organized countercurrent two-phase interaction. The results of the work done are the following: gabarit was 2.0-2.5 times decreased; specific consumption of materials of economizers was 3.0-3.3 times decreased.

Ключові слова: контактний экономайзер, регулярна насадка, зигзаговий канал.

підписано до друку 24.04.95г.

Друк офсетний. Папір офсетний., Тир.60 экз., Звк. № 8
СКТБ "Модуль" , Хмельницька дорога , 95

452966

A_B

32.658

AB 32.658