МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІВ. ПУЛЮЯ

на правах рукопису

ШЕПТАЛІН Микола Вікторович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В КАНАЛАХ РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

05.13.02 Математичне моделювання у наукових дослідженнях

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль
1996

Робота виконана в Хмельницькому технологічному університеті Поділля

Наукові керівники:

кандидат хімічних наук, доцент В.Г.Камбург
кандидат фізико-математичних наук, доцент Г.Н.Ліпатов

Офіціальні опоненти:

доктор технічних наук, академік АНТКУ Г.Є.Канівець
доктор фізико-математичних наук, професор М.П.Ленюк

Провідна організація:

Херсонський індустріальний інститут

Захист дисертації відбудеться "26" 12 1996 р. в __ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради по присудженню вченого ступеня кандидата технічних наук К 12.02.02 в Тернопільському приладобудівному інституті імені Ів. Пулюя.

Адреса: 282001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці ТПІ імені Ів. Пулюя.

Дата розсилки автореферату: "25" 11.96 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук М.Р.Петрик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На теперішній час у вітчизняних дослідженнях практично відсутні розробки, присвячені математичному моделюванню процесів, які відбуваються в каналах під впливом сил термо- та дифузіофорезу при протіканні парогазового потоку, які б з одного боку були достатньо універсальними і зручними у використанні, а з іншого боку дозволяли б отримувати результати з необхідною точністю в широкому діапазоні змін фізичних параметрів системи. Незважаючи на численні теоретичні роботи, а також експериментальні дослідження в цієї області (А.Г.Амелін, Ю.І.Яламов, Г.Н.Ліпатов, Г.Л.Шингарев) досі не вдалося побудувати ефективного алгоритму розрахунку поля пересичення, який би давав надійні кількісні оцінки для низькошвидкісних режимів протікання потоку (числа $Pe < 10$), хоча саме ці режими присутні в реальних технологічних процесах. Разом з тим, в умовах постійного погіршення екологічної ситуації в результаті інтенсивного розвитку промисловості все більшого значення набуває проблема термодифузіофоретичного переносу в задачах тонкої очистки газів від аерозольних домішок.

В зв'язку із значним збільшенням вартості експериментальних досліджень виникає потреба в розробці нових методів, побудові математичних моделей і створенні гнучких програмних комплексів для розв'язку задач по розрахунку полів температури, концентрації, пересичення в каналах різної конфігурації при різних швидкостях протікання потоку, а також проводити аналіз конденсаційного росту і формування траєкторій аерозольних частинок, які рухаються під впливом градієнтів температури і концентрації.

Таким чином, враховуючи наукову і практичну важливість проблеми слід вважати актуальним проведення робіт по створенню математичних моделей і програмного комплексу для розв'язку окреслених задач.

Метою роботи є побудова і обгрунтування математичних моделей, розробка програмного комплексу, а також дослідження деяких загальних закономірностей процесів тепломасопереносу в каналах різних конфігурацій на їх основі.

Наукова новизна винесених на захист результатів полягає у наступному:

- побудована узагальнена математична модель, яка дозволяє досліджувати процеси розподілу полів температури, концентрації і пересичення в каналах різної конфігурації як при низьких, так і при високих швидкостях протікання парогазового потоку;

- теоретично обгрунтовані створені алгоритми, детально досліджені умови їх обчислювальної стійкості, окреслені границі їх працездатності стосовно основних параметрів моделі;

- дана кількісна оцінка експериментальних результатів в залежності від швидкості парогазового потоку, його температури, теплофізичних властивостей, температурного градієнту на стінці каналу, геометричної форми каналу;

- проаналізований ступінь впливу перерахованих чинників на процеси тепломасопереносу і пароутворення;

- встановлений ряд загальних закономірностей утворення поля пересичення для нізькошвидкісних потоків;

- уточнені результати по динамиці росту аерозольних частинок в низькошвидкісних потоках і формуванню їх траєкторій;

- введена і досліджена функція "проскоку", як міра ефективності осадження аерозольних частинок, в залежності від довжини каналу;

- створений програмний комплекс, який реалізує описану модель, і дозволяє розширювати окреслений клас задач, використовуючи об`єктно-орієнтований підхід;

Практична значущість. Результати роботи можуть бути використані:

1) в промисловій екології для

-проектування фільтрів тонкої очистки газів від аерозольних домішок;

- аналізу технологічних процесів, які використовують процеси випаровування і конденсації в каналах, з метою вибору оптимальних умов;

2) у фізиці аеродисперсних систем для

- дослідження механізму утворення пересичення;

- дослідження процесів поведінки аерозольних частинок в полях градієнтів температури і концентрації пари;

3) в камбустіології при моделюванні режимів роботи абсолютних аерозольних фільтрів для створення антибактеріцидного пароповітряного середовища.

4) в експериментальній метеорології для

- визначення активності атмосферних ядер конденсації;

- вивчення процесів формування і динаміки хмар;

Створений програмний комплекс використовується в наступних установах:

1) в лабораторії фізики аерозолів при Одеському держуніверситеті для проектування термодифузійних камер (ТДК) і гравітаційно-конденсаційних фільтрів;

2) на кафедрах промислової екології і вищої математики та комп'ютерної техніки ХТУ Поділля в учбовому процесі;

3) в науково-виробничому департаменті "Марін" Лтд., м. Одеса при проектуванні термодифузійних фільтрів, впровадження яких в обласних опікових центрах України дозволяє економити до 2.750.000 гривень в рік.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях і семінарах:

- республіканський семінар "Математичне моделювання", Чернівці, 1993 р., керівник доктор фіз.-мат. наук, проф. Івасишин С.Д.
- семінар "Моделювання і оптимізація хіміко-технологічних процесів і апаратів", Чернівці, РЦ "Укрекологія", 1992 р., керівник доктор техн. наук, академік АНТКУ Канівець Г.Є.
- II міждержавна науково-практична конференція "Методы исследования, паспортизации и переработки отходов", Пенза, 7-8 липня 1994 р.
- міжнародна наукова конференція, присвячена пам`яті Ганса Гана, Чернівці, 10-15 жовтня 1994 р.
- міжнародна наукова конференція, присвячена 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя, Тернопіль, 24-28 травня 1995 р.
- семінар кафедри вищої математики і комп`ютерної техніки, Хмельницький, університет Поділля, 1995 р., керівник доктор техн. наук, проф. Рудницький В.Б.
- семінар кафедри промислової екології, Хмельницький, університет Поділля, 1996 р., керівник канд. хім. наук, доц. Камбург В.Г.
- семінар кафедри ОХТ, Тернопіль, приладобудівний інститут імені Ів. Пулюя, 1996 р, керівник доктор техн. наук, проф. Молчанов А.Д.

Публікації. По матеріалах дисертації опубліковано 7 робіт у вигляді наукових статей, трудів наукових конференцій і тез доповіді.

Структура і об'єм роботи. Основний зміст дисертації викладено на 140 сторінках машинописного тексту. Робота складається із вступу, п'яти розділів, основних висновків, додатків, списку літератури з 124 найменувань і містить 36 графіків, 5 малюнків, 14 таблиць.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

<u>У вступі</u> розглядується питання про актуальність теми досліджень, обгрунтовується мета роботи і її практична значущість, вказується наукова новизна отриманих результатів.

<u>В першому розділі</u> дається короткий огляд основних проблем, що виникають при моделюванні процесів конвекційного тепломасообміну в каналах, аналізуються недоліки існуючих моделей, визначаються основні вимоги до методів, за допомогою яких моделі тепломасообміну зможуть з достатньою точністю описувати конкретні технологічні ситуації.

Об'єктом моделювання вибраний пристрій, відомий в літературі, як термодифузійна камера (ТДК), який використовується в експериментальних дослідженнях процесів конвекційного тепломасообміну. Принцип дії ТДК полягає в одночасному протіканні в системі процесів теплопровідності і молекулярної дифузії при протіканні парогазового потоку в каналі між двома пластинами неоднакової температури, внутрішня сторона яких змочена рідиною. Робиться висновок про недостатню вивченність низькошвидкісних режимів протікання потоку в ТДК і визначаються напрямки подальших досліджень за наступною схемою.

1. Побудова і обгрунтування математичної моделі, яка описує температурно-концентраційні поля в каналах, залежно від теплових режимів на границях і форм каналу, як для високо-, так і для низькошидкісних режимів протікання потоку.

2. Моделювання полів пересичення на підставі розрахованих полів температури і концетрації.

3. Дослідження динаміки росту частинок в потоці, що протікає через канал, на підставі розрахованих полів пересичення.

4. Побудова траєкторій частинок на підставі даних про динаміку їх росту і пересичення.

Розв'язок кожної з окреслених задач з одного боку має своє практичне застосування в певній галузі, а з іншого боку являє собою вихідні дані для розв'язку задач наступного класу.

<u>В другому розділі</u> розв'язується задача моделювання полів пересичення в щілинному каналі при наступних припущеннях:

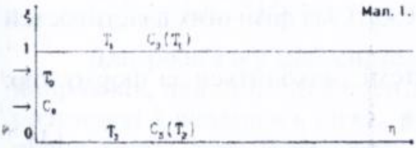
1. Газовий потік, що втікає в канал, - ламінарний, сформований до входу в канал і підпорядковується закону Пуазейля.

2. Фізичні властивості газу вважаються постійними (коефіцієнти температуропровідності і дифузії пари в газі не зале-

жать від температури).

3. Вплив потоку Стефана, термодифузії і дифузійної теплопровідності не враховується.

4. Поля температури і концентрації пари сформовані і не змінюються з часом.



Мал. 1.

Стінки каналу зволожені і мають температури T_1 і T_2. Концентрація пари поблизу стінок C_1 і C_2 вважається насиченою. Ширина каналу d набагато менша від його довжини L. На вхід в канал поступає парогазова суміш з середньою швидкістю руху <V> ,температурою T_0 і концентрацією пари C_0

Розподіл полів температури і концентрації пари всередені каналу після приведення до безрозмірних координат (мал. 1) описується наступною системою рівнянь:

$$P_T(\xi)\,\frac{\partial T(\xi,\eta)}{\partial\eta} = \frac{\partial^2 T(\xi,\eta)}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2 T(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}, \qquad (1)$$

$$P_C(\xi)\,\frac{\partial C(\xi,\eta)}{\partial\eta} = \frac{\partial^2 C(\xi,\eta)}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2 C(\xi,\eta)}{\partial\eta^2}$$

де для щілинного каналу описаного типу:

$$P_T(Pe,\xi) = 6\cdot Pe(\xi-\xi^2),$$

$$P_C(\overline{Pe},\xi) = 6\cdot \overline{Pe}(\xi-\xi^2),$$

Pe, $\overline{Pe}$ - теплові і дифузійні числа Пекле - безрозмірні параметри, які залежать від коефіцієнтів температуропровідності суміші і диффузії пари в газі, відповідно, а також від середньої швидкості потоку і відстані між поверхнями. Зв`язок між температурою і концентрацією здійснюється через граничні умови:

$$\begin{aligned} &T(\xi,\eta)\big|_{\eta\le 0} = T_0, && C(\xi,\eta)\big|_{\eta\le 0} = C_0, \\ &T(0,\eta) = T_1, && C(0,\eta) = C_S(T_1) = C_1, \qquad (2) \\ &T(1,\eta) = T_2, && C(1,\eta) = C_S(T_2) = C_2, \\ &T(\xi,L) = T_1 + (T_2-T_1)\xi = T_L, && \\ & && C(\xi,L) = C_1 + (C_2-C_1)\xi = C_L \end{aligned}$$

Значення C_1, C_2 розраховуються за законом Клаузіуса-Клайперона:

$$C_s\left[T(\xi, \eta)\right] = \exp\left[A_0 - \frac{B_0}{T(\xi, \eta)}\right] \qquad (3)$$

де A_0, B_0 - коефіцієнти, які залежать від фізичних властивостей речовини.

Пересичення в такій системі знаходиться за формулою:

$$\delta(\xi, \eta) = \frac{C(\xi, \eta)}{C_s\left[T(\xi, \eta)\right]} - 1 \qquad (4)$$

Для розв'язку цієї задачі використовується метод встановлення. Розглядається допоміжна нестаціонарна задача, в припущенні, що її розв'язок при $t \to \infty$ співпадає з розв'язком вихідної задачі.

$$\alpha \frac{\partial u(\xi, \eta, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(\xi, \eta, t)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u(\xi, \eta, t)}{\partial \eta^2} - P(\xi)\frac{\partial u(\xi, \eta, t)}{\partial \eta} \qquad (5)$$

Оскільки розв'язки рівнянь для температури T і концентрації C аналогічні вводяться позначення:

$$u = \begin{pmatrix} T(\xi, \eta, t) \\ C(\xi, \eta, t) \end{pmatrix}; \quad P(\xi) = \begin{pmatrix} P_T(\xi) \\ P_C(\xi) \end{pmatrix},$$

До граничних умов додається початкове:

$$u(\xi, \eta, 0) = u^0,$$

Вводяться оператори:

$$L_1 = \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} - P(\xi)\frac{\partial}{\partial \eta}, \qquad L_2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \qquad (6)$$

В цих позначеннях задача набуває вигляду:

$$L_1 u + L_2 u = \alpha \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (7)$$

Припускається, що $u^k = u(\xi, \eta, t_k)$ розв'язок на k-ому часовому рівні, $u^{k+1} = 2u^{k+1/2} - u^k$, де $u^{k+1/2}$ - розв'язок на деякому проміжному рівні. Враховуючи раніше зроблені зауваження і позначаючи $\tau_k = t_{k+1} - t_k$, задача (7) записується у вигляді:

$$L_1 u^{k+1/2} - \frac{2}{\tau_k} u^{k+1/2} = -F^k, \qquad (8)$$

$$L_2 u^{k+1} - \frac{2}{\tau_k} u^{k+1} = -F_j^{k+1/2}, \tag{9}$$

$$F_i^k = L_2 u^k(\xi_i, \eta) + \frac{2}{\tau_k} u^k(\xi_i, \eta), \tag{10}$$

$$F_j^{k+1/2} = L_1 u^{k+1/2}(\xi, \eta_j) + \frac{2}{\tau_k} u^{k+1/2}(\xi, \eta_j). \tag{11}$$

Для розв'язку цієї системи був вибраний метод змінних напрямків, для чого диференціальні оператори замінялись на ризницеві і вводилась сітка, рівномірна по кожній з просторових координат. Розрахунок проводився за наступною схемою: розв'язок на к-му рівні вважався відомим, за рівнянням (8) знаходився розв'язок на рівні k+1/2, потім за рівнянням (9) знаходився розв'язок на к+1-му рівні, здійснювався перехід на наступий рівень і обчислення повторювались.

Рівняння (8)-(9) розв'язувались методом прогонки.

Були розглянуті питання, які стосуються обчислювальної стійкості чисельного розв'язку задачі (7) за описаним алгоритмом. Дослідження стійкості базувались на доведенні наступних теорем:

Теорема 1. (Про стійкість методу прогонки для розв'язку рівнянь (8)-(9)).

При наступних умовах метод прогонки для розв'язку рівнянь (8)-(9) є стійким.

1) для будь-якого τ_k, якщо $h_j \le \dfrac{2}{\max\limits_{\xi} P(\xi)}$.

2) $\tau_k \le \dfrac{2h_j^2}{h_j \max\limits_{\xi} P(\xi) - 2}$ в решті випадків.

Наслідок. Для щілинного каналу, що розглядається, умови стійкості запишуться в вигляді:

для будь-якого τ_k, якщо $h_j \le \dfrac{4}{3Pe}$,

для $\tau_k \le \dfrac{2h_j^2}{1.5 \cdot Pe \cdot h_j - 2}$, якщо $h_j > \dfrac{4}{3Pe}$.

Система (7) була приведена до канонічної форми:

$$B_k v_t^k + Rv^k = 0, \tag{12}$$

і для для дослідження її стійкості, збіжності і оцінки точності був застосований стандартний математичний апарат.

Теорема 2. (про безумовну стійкість методу змінних напрямків для розв'язку рівнянь (8)-(9)).
Доведення теореми базувалось на доведенні двох лем.

Лема 2.1. (Про властивості операторів R_1, R_2).

Оператори R_1, R_2 є додатніми, оператор R_2 - самоспо-лучений.

Лема 2.2.

Нехай задані оператори :

$A_1 \geq 0$, $A_2 > 0$, $B_1 > 0$, $B_2 > 0$, діючи з X в Y (X,Y- лінійні нормовані простори) і $\|B_1 + B_2\| > 0$, тоді достатньою умовою стійкості різницевої схеми $Av_t + Bv = 0$, де

$$A = A_1 + A_2, \quad B = B_1 + B_2,$$

є одночасна стійкість різницевих схем:

1) $A_1 v_t + B_1 v = 0$ і 2) $A_2 v_t + B_2 v = 0$.

Було показано, що всі оператори в рівнянні (12) мають другий порядок апроксимації і метод є збіжним зі швидкостю:

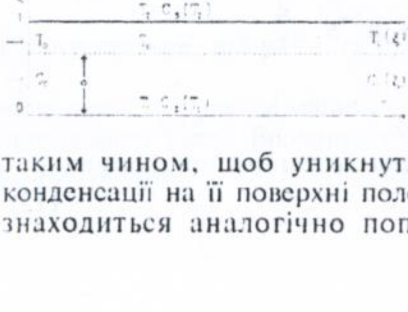
$$O(\tau_k^2 + |h|^2), \text{ де } |h|^2 = |h_i^2 + h_j^2|.$$

Можливості методу і отримані умови обчислювальної стійкості в залежності від геометричних і фізичних параметрів ТДК дозволяють обгрунтувати і суттєво розширити інтервали моделювання порівняно з попередніми дослідженнями.

<u>В третьому розділі</u> проводиться узагальнення розглянутої задачі на інші типи каналів.

1. Щілинний канал зі змінною температурою стінок. З точки зору методу ця конструкція ТДК буде відрізнятись від розглянутої в попередньому розділі лише граничними умовами.
2. Щілинний канал з сітчастим нагрівним елементом (мал. 2).

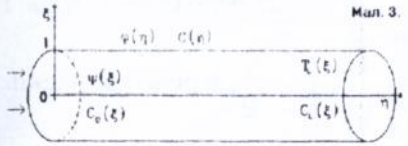
Мал. 2.



В цьому каналі реалізується ефективний спосіб управління пересиченням, за допомогою введення в робочий об'єм каналу нагрівного елементу у вигляді сітки. Оскільки температура сітки вибирається таким чином, щоб уникнути процесів випаровування і конденсації на її поверхні поле концентрації в даній системі знаходиться аналогічно попередньому випадку, а поле температури знаходиться окремо для областей:

$$D_1:\{0 \le \xi \le \alpha,\ 0 \le \eta \le L\},\ D_2:\{\alpha \le \xi \le 1,\ 0 \le \eta \le L\}$$

3. Циліндричний канал зі змінною температурою стінки (мал. 3).



Запропоновано процеси тепломасопереносу в щілинних і циліндричних каналах описувати наступним узагальненим рівнянням:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + f(\xi)\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} - P(\xi)\frac{\partial u}{\partial \eta} = 0 \qquad (13)$$

$$u|_\Gamma = \varphi(\xi, \eta),$$

Для щілинних каналів:

$$P_T(Pe, \xi) = 6 \cdot Pe(\xi - \xi^2),\ P_C(\overline{Pe}, \xi) = 6 \cdot \overline{Pe}(\xi - \xi^2)$$

$$f(\xi) = 0$$

Для циліндричного каналу:

$$P_T(Pe, \xi) = Pe(1 - \xi^2),\ P_C(\overline{Pe}, \xi) = \overline{Pe}(1 - \xi^2)$$

$$f(\xi) = 1/\xi$$

Дана задача розв'язувалась методом встановлення, який детально був описаний в попередньому розділі.

Вводяться оператори:

$$L_1 = \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} - P(\xi)\frac{\partial}{\partial \eta},\ L_2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + f(\xi)\frac{\partial}{\partial \xi}$$

При цих позначеннях задача (13) набуває вигляду:

$$L_1 u + L_2 u = \alpha \frac{\partial u}{\partial t} \qquad (14)$$

Відмінність від задачі (7) полягає в тому, що оператори L_1, L_2 мають різний вигляд, залежно від типу каналу. Отже, розрахунковий алгоритм будується за однією і тією ж схемою для всіх розглянутих типів каналів, а питання, які стосуються обчислювальної стійкості і збіжності методу розглядуються для кожного типу ТДК окремо у вигляді наслідків на основі дослідження узагальненої схеми. Були доведені наступні теореми.

Теорема 3. (Про стійкість методу прогонки для розв'язку узагальненої задачі (14)).

Метод прогонки для розв'язку рівнянь (14) є стійким при наступних умовах:

1) для будь-якого τ_k, якщо $h \le \dfrac{2}{\max\limits_{\xi}\{f(\xi), P(\xi)\}}$

2) $\tau_k \le \dfrac{2h_j^2}{h_j \max\limits_{\xi}\{f(\xi), P(\xi)\} - 2}$, в решті випадків.

Наслідок 1.

Функція $f(\xi)$ не впливає на стійкість методу прогонки для тих видів каналів, які розглядаються.

Наслідок 2.

Для циліндричного каналу умови стійкості можуть бути записані в наступному вигляді:

1) для будь-якого τ_k, якщо $h_j \le \dfrac{2}{Pe}$,

2) $\tau_k \le \dfrac{2h_j^2}{Pe \cdot h_j - 2}$, в решті випадків.

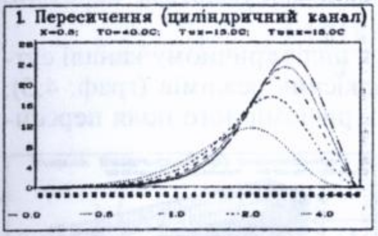
Теорема 4. (про безумовну стійкість методу змінних напрямків для розв'язку узагальненої задачі (14)).

Описані в роботі моделі були реалізовані у вигляді комп'ютерної програми "CHANNEL" на платформі IBM PC.

Програма описує: поля температури, концентрації, пересичення пари, ріст частинок, їх траєкторії. З метою оптимізації роботи програми був вжитий ряд заходів, зокрема застосований метод Дугласа-Рекфорда зі змінним кроком в часі. Цей метод дає можливість попередньо оцінити кількість ітерацій, необхідних для досягнення певної точності. Вихідними даними цього методу є границі спектру операторів задачі (14). Ці оцінки були отримані і опубліковані в роботах [1],[3]. Програма показала свою працездатність, відповідність описаним моделям і може використовуватися як інструмент при дослідженнях процесів тепломасообміну в каналах різної конфігурації.

<u>В четвертому розділі</u> проводиться чисельний аналіз основних закономірностей формування полів пересичення як результату розрахунку полів температур і концентрацій пари в каналах різних типів. Отримані дані прорівнюються з відомими раніше. Показується адекватність моделей.

Умовами адекватності побудованої моделі є безперервна залежність розв'язку від вихідних даних і збіжність до вже відомих результатів. В даному випадку модель має два граничних випадки.



1. Рух в каналі відсутній. Така система описується класичною теорією теплообміну.

2. Високошвидкісний режим протікання потоку. Така система була детально досліджена в Одеському держуніверситеті, отримані результати були підтверджені експериментально.

Перший випадок досягається, коли в рівнянні (13) коефіцієнт Pe=0 (рівняння Лапласа), другий випадок, коли Pe=25.4. На графіку 1 показана збіжність розв'язку моделі при Pe -> 0 до розв'язку рівняння Лапласа. На графіку 2 результати зіставляються з вже відомими для високошвидкіних режимів. Слід підкреслити, що згідно з проведеним дослідженням розрахункова схема при Pe = 0 є безумовно стійкою. Це також відповідає відомим результатам. Отже адекватність моделі слід вважати доведеною.

Комп`ютерна реалізація методу дозволяє розглянути характерні результати моделювання, отримані за запропонованою схемою. Були проведені чисельні експерименти по дослідженню:

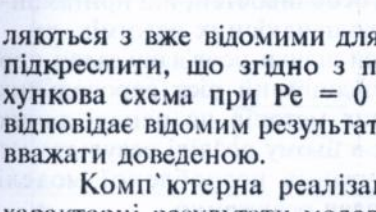
1) динаміки формування поля пересичення в каналі при зміні коефіцієнта Pe;

2) залежності максимуму пересичення від різниці температур на стінках щілинного каналу;

3) основних закономірностей формування полів пересичення в щілинному каналі зі змінною температурою стінок;

4) формування поля пересичення в щілинному каналі з сітчастим нагрівним елементом (граф. 3);

5) формування поля пересичення в циліндричному каналі зі змінною температурою стінки. Результати чисельних експери-



ментів показали, що для низькошвидкісних режимів:

1) формування зони стабілізації в щілинному каналі відбувається поблизу входу, що дозволяє суттєво скоротити як довжину каналу, так і зону, на якій відбуваються перехідні процеси при вході в канал;

2) форма поля пересичення в циліндричному каналі суттєво відрізняється від високошвидкісних режимів (граф. 4,5);

3) для створення і підтримки рівномірного поля пересичення в циліндричному каналі оптимальним є режим лінійного наростання температури стінки.


4. Пересичення (циліндричний канал)


5. Пересичення (циліндричний канал)

Крім того, був вказаний ряд особливостей, які притаманні як для високо- так і для низькошвидкісних режимів.

<u>В п'ятому розділі</u> вказуються шляхи розв'язку задач про знаходження траєкторій і конденсаційний ріст аерозольних частинок за допомогою чисельних методів на основі даних про пересичення пари. Отримані в цьому розділі результати є прикладом практичного застосування розробленої моделі тепломасообміну в каналах для задач осадження.

Задача про траєкторії розв'язувалась для щілинного горизонтального каналу, в якому протікає ламінарний пуазейлевський потік з великими аерозольними частинками розміром до 10 мкм, взаємодія між якими відсутня, а розподіл швидкості описується наступною формулою:

$$v_z(x) = v_0\left[\frac{4x}{d} - \left(\frac{2x}{d}\right)^2\right].$$

Вважаючи рух частинки квазірівномірним, траєкторія руху частинки в плоскому щілинному каналі може бути записана в наступному вигляді:

$$\frac{dx}{dt} = v_x(t) \qquad \frac{dz}{dt} = v_z[x(t)]$$

При зроблених припущеннях вирази для вертикальної і горизонтальної складових швидкості можуть бути записані у вигляді:

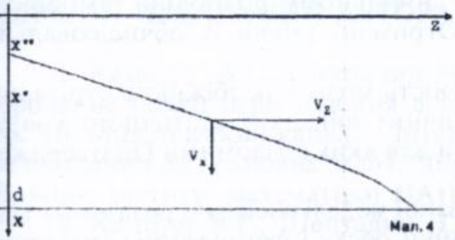
$$v_x(t) = k_1\left(k[x(t)]\cdot t + R_0^2\right),$$

$$v_z[x(t)] = v_0\left[\frac{4x(t)}{d} - \left(\frac{2x(t)}{d}\right)^2\right], \quad k_1 = \frac{2}{9}\frac{\rho_l g}{\eta_1}$$

$$k(x) = \frac{\dfrac{D_{12}\mu_1 p_\infty}{RT_{1\infty}\rho_l}\,\delta(x)}{1 + \left(\dfrac{\mu_1 L}{R}\right)^2 \dfrac{D_{12}p_\infty}{\lambda_1 (T_{1\infty})^3}\, C_{1S}(T_{1\infty})}$$

Рівняння для розрахунку конденсаційного росту частинки набуде вигляду:

$$R(x,t) = \sqrt{R_0^2 + 2C_{1S}(T_{1\infty})k(x)t}$$



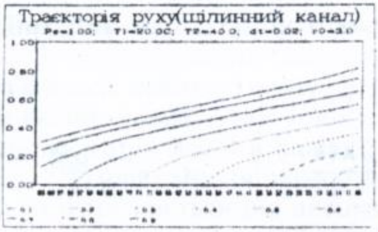
Мал.4

Дана задача була розв'язана чисельними методами. В задачах осадження доцільно розглядати співвідношення потоків частинок на вході і виході каналу для оцінки ефективності фільтру. Проведені дослідження показали, що можна виділити дві почакові координати x*, x** при яких всі частинки з початковими координатами x>x*, x<x** будуть падати на нижню стінку раніше, ніж частинки з початковими координатами x**< x < x* (мал.4), тому співвідношення потоків можна записати у вигляді функції проскоку:

$$K(z) = \frac{\int_{x^{**}}^{x^{*}} v_z(x)dx}{\int_0^d v_z(x)dx} = \frac{4}{d}\left[\frac{(x^*)^2 - (x^{**})^2}{2} - \frac{(x^*)^3 - (x^{**})^3}{3d}\right]$$

Функція проскоку дозволяє роглядати задачу оптимізації довжини каналу.

Були проведені чисельні експерименти по дослідженню впливу на формування траєкторії частинки і динаміку її росту



початкового радіусу частинки і поля пересичення в каналі (граф. 5).

Таким чином, завдяки запропонованому алгоритму можна на практиці вирішувати задачу мінімізації температурного градієнта для 100%-го осадження залежно від довжини каналу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблена математична модель, яка дозволяє розраховувати поля температури, концентрації, пересичення пари в різних типах щілинних і циліндричних каналів як для високо- так і для низькошвидкісних режимів протікання парогазової суміші.

2. Розвинуті чисельні методи розв'язку модельних рівнянь тепломасопереносу при довільному розподілі температур вздовж стінок каналів. Отримані умови їх обчислювальної стійкості.

3. Показана адекватність моделі як збіжність отриманих результатів до двох граничних випадків: статичного і високошвидкісного, результати для яких є відомими і підтверджені експериментально.

4. На основі побудованої моделі чисельно розв'язана задача по дослідженню динаміки росту і формуванню траєкторій аерозольних частинок, які рухаються в каналі під впливом сил термо- та дифузіофорезу.

5. Створена комп'ютерна програма для розрахунку полів температури, концентрації, пересичення пари, динаміки росту аерозольних частинок та формування їх траєкторій в залежності від швидкості парогазового потоку, його температури, теплофізичних властивостей, температурного градієнту на стінці каналу, геометричної форми каналу. Проаналізований ступінь впливу перерахованих чинників на процеси тепломасопереносу і пароутворення.

6. Проведені чисельні експерименти та їх порівняння з даними фізичних експериментів. Вказані особливості, притаманні низькошвидкісним потокам і встановлені:

- основні закономірності формування поля пересичення в каналах при зміненні коефіцієнта Pe;

- залежності максимуму пересичення від різниці температур на стінках щілинного каналу;
- основні закономірності формування поля пересичення в щілинному каналі зі змінною температурою стінок;
- основні закономірності формування поля пересичення в щілинному каналі з сітчастим нагрівним елементом;
- основні закономірності формування поля пересичення в циліндричному каналі зі змінною температурою стінки;
- ступінь впливу початкового радіуса частинки і поля пересичення на динаміку її росту і траєкторію.

7. Вказані шляхи за якими побудована модель може бути ускладнена і описувати процеси тепломасообміну з врахуванням додаткових фізико-хімічних чинників.

8. Запропонований підхід дозволяє суттєво скоротити витрати на проведення експерементальних досліджень для різноманітних систем, процеси в яких відбуваються під дією градієнтів температур і концентрацій.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРА ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Камбург В.Г., Шепталин Н.В., Шингарев Г.Л. Моделирование полей пересыщения в термодиффузионных камерах. Цилиндрический канал. - Інтегральні перетворення та їх застосування до крайових задач. Збірник наукових праць, вип. 10, Київ, інститут математики НАНУ, 1995 р. - с. 80-90.

2. Камбург В.Г., Шепталин Н.В. О новом подходе в математическом моделировании процессов, протекающих в динамических термодиффузионных камерах разных типов. - Інтегральні перетворення та їх застосування до крайових задач. Збірник наукових праць, вип. 13, Київ, інститут математики НАНУ, 1995 р. - с. 68-71.

3. Камбург В.Г., Шепталин Н.В., Шингарев Г.Л. Моделирование полей пересыщения в термодиффузионных камерах. Щелевой канал. - Труди міжнародної конференції, присвяченої пам`яті Ганса Гана, Чернівці, 10-15 жовтня 1994 р. - с. 134-141.

4. Камбург В.Г., Шингарев Г.Л., Шепталин Н.В. Моделирование и интенсификация режимов работы динамических термодиффузионных камер. Тезисы II Межгосударственной научно-практической конференции "Методы исследования, паспортизации и переработки отходов". Пенза, 7-8 июня 1994 г. - с. 77-78.

5. V.Kamburg, N.Sheptalin, L.Kolos. Improvement of the operating conditions of dynamic thermodiffusive cells with chink and cylindrical canals. Тези Міжнародної наукової конференції присвяченої 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя, Тернопіль, 24-28 травня 1995 р. - с. 27-28.

6. Камбург В.Г., Шепталин Н.В., Липатов Г.Н. Оптимизация двух конструкций ТДК методами математического моделирования. -Тезисы международной научной конференции "Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств, систем", Пенза, 05.06.95.

7. Шепталін М.В. Узагальнена математична модель процесів тепломасообміну в термодифузійних камерах (ТДК). - Моделирование и исследование устойчивости систем. Тезисы докладов, Киев, 20-24 мая 1996. - с. 152.

8. Шепталин Н.В., Камбург В.Г., Липатов Г.Н. Исследование закономерностей формирования полей пересыщения в поточных ТДК методами математического моделирования. - Знаходиться у друці.

Sheptalin M.V. The mathematcal modelling of process of heatmass transfer in channells of several configuration. Thesis for M.Sc.Degree in technical sciences on speciality 05.13.02 - mathematical simulation in scientific investigations.
A work of several configuration of thermo-diffusial chambers has been analysed in wide range of parameters. Physical-chemical processes have been modelled on base of solution of stationar convective heatmass transfer equations. Computer program for solution of this equations have been created using modificated method of fraction steps. Number experiments of forming supersaturations fields and particles moves have been made. Method and computer program are recommended as a tool for investigations in ecology and experimental meteorology.

Шепталин Н.В. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в каналах различной конфигурации. Диссертация на соискание ученой степени кандидита технических наук.по специальности 5.13.02 - математическое моделирование в научных исследованиях.
В работе разработана математическая модель и компп'терная программа, позволяющие описывать процессы, протекающие в каналах под действием сил термо- и диффцузиофореза на основе решения уравнений конвективного тепломассопереноса методом дробных шагов.
Проведены численные экспериенты по исследованию формирования поля пересыщения и траекторий частиц. Модель и программа могут быть использованы в задачах экологии и экспериментальной метеорологии.

436117

Ав 36.142