

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

ШАЛДЕНКО Олексій Вікторович

УДК 532.542

**ГІДРОДИНАМІКА І ТЕПЛООБМІН В КАНАЛАХ ЗІ ВСТАВКАМИ
СКЛАДНОЇ ФОРМИ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОВІДВОДУ РЕА**

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

**Автореферат
дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизації проектування енергетичних процесів і систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Гуржій Олександр Андрійович,
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Лимарченко Олег Степанович
Київський національний університет ім. Тараса Шевченка
завідувач кафедри механіки суцільних середовищ

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Малюга Володимир Сергійович
Інститут гідромеханіки НАН України
старший науковий співробітник відділу гідродинамічної акустики

Захист відбудеться 30 травня 2017 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.09 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою:
03056, м. Київ, пр.Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою:
03056, м. Київ, пр.Перемоги, 37

Автореферат розісланий “10” квітня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.І.Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Стрімкому розвитку сучасної обчислювальної техніки за останні роки сприяють дві чітко сформовані тенденції, викликані істотним зростанням тактової частоти мікропроцесорів і значним ускладненням його елементної бази та структури. Вони дозволили в середині 60-х років минулого століття G.E.Moore сформулювати емпіричний закон, згідно з яким кожні два роки загальна кількість електронних елементів у мікропроцесорах збільшується в середньому в два рази. При цьому прагнення до мініатюризації елементів радіоелектронної апаратури (РЕА) призводить до помітного збільшення питомого тепловиділення на поверхні електронного пристрою.

Актуальність теми досліджень обумовлена широким застосуванням приладів теплопередачі в науці та техніці. У перспективі кількість елементів у мікропроцесорах може бути доведена до значень $\approx 10^{10} \dots 10^{11}$. Необхідність охолодження таких пристроїв формує сьогодні нову технічну задачу формування надійного, стійкого і контрольованого відводу виділеної теплоти з поверхні мікроелектронних приладів РЕА.

Аналіз сучасної наукової літератури показує, що повітряний примусовий тепловідвід з поверхні РЕА, який сьогодні застосовується в обчислювальній техніці, фактично виходить на свої граничні можливості. Одним із технічних рішень цієї проблеми є створення в кристалах елементів РЕА системи каналів із рідким теплоносієм, який може виводити необхідну кількість тепла у зовнішній охолоджуючий пристрій.

Технічна значущість теми досліджень пов'язана з розробкою конструкції теплоприймача в підкладці елементів РЕА, що дозволяє встановити надійне і кероване охолодження при заданому значенні щільності виділення теплової енергії на кристалах для сучасної та перспективної обчислювальної техніки, інших пристроїв РЕА.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі автоматизації проектування енергетичних процесів і систем (АПЕПС) теплоенергетичного факультету Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки “Енергетика та енергоефективність” (ЗУ № 2519-VI від 9.09.2010 р.). Окремі розділи дисертаційної роботи входять в НДР “Чисельне моделювання процесів переносу скалярних полів у системах з розподіленими параметрами” (держ. реєст. N 0116U003816).

Мета і задачі досліджень. Метою даної роботи є підвищення рівнів питомої теплопередачі з кристала підкладки елементів РЕА в рідкий теплоносій за рахунок введення в канал системи вставок різної геометрії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Сформулювати і обґрунтувати математичну постановку задачі переносу тепла в криволінійному каналі з системою вставок різної геометрії.
2. Провести дискретизацію нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними для проведення чисельного моделювання процесів переносу тепла всередині криволінійних каналів, заповнених однорідною в'язкою нестисливою рідиною.
3. Провести чисельне моделювання у двовимірному наближенні процесів теплопередачі із зовнішнього нагрітого середовища в холодний теплоносій для зигзагоподібних каналів кінцевої довжини з системою вставок різної геометрії.

4. Виявити основні закономірності впливу геометрії вставок всередині прямолинійного і зигзагоподібного каналів на гідродинамічні та термодинамічні процеси в рідині в залежності від швидкості течії теплоносія.

5. Одержати кількісні данні рівнів усереднених теплових потоків із зовнішнього нагрітого середовища в холодний теплоносій та значень гідродинамічних параметрів течії рідини для каналів з системою вставок різної геометрії.

6. Провести порівняльний аналіз рівнів теплових потоків у каналах з метою виявлення найбільш ефективної геометрії вставок для заданої швидкості теплоносія.

Об'єкт дослідження – робочий процес в системах охолодження рідким теплоносієм в елементах РЕА.

Предмет дослідження – гідродинамічні і термодинамічні закономірності процесу теплообміну всередині зигзагоподібних каналів, заповнених однорідним в'язким теплоносієм, з системою вставок різної геометрії при малих числах Рейнольдса.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалася загальноприйнята модель рідини, коректна математична постановка задачі, надійні чисельні методи розв'язання задач математичної фізики. При виконанні розрахунків виконувався комплексний аналіз точності розв'язання початково-крайової задачі, що базується на аналізі точності виконання законів збереження енергії, маси та імпульсу. У роботі проводилося комплексне тестування чисельних методів дослідження гідродинамічних процесів і процесів теплопередачі, що базується на порівняльному аналізі результатів чисельного моделювання з даними, опублікованими у світовій і національній науковій літературі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку обчислювальних методів розрахунку фізичних полів в охолоджуючих каналах РЕА. Одержано наступні нові результати, які виносяться на захист:

1. Вперше розв'язана задача переносу тепла із зовнішнього нагрітого середовища в холодний теплоносій з використанням чисельних методів, адаптованих для каналів з довільною геометрією обмежуючих поверхонь на рівномірній сітці в наближенні малих чисел Рейнольдса Re .

2. Встановлена умова стійкості простої явної схеми числового розв'язку нелінійних параболічних рівнянь переносу завихреності і тепла на рівномірній сітці.

3. Вперше встановлена кількісна залежність рівнів теплових потоків крізь границі криволінійних каналів зі вставками і різниці тисків на вході і виході каналів від швидкості течії теплоносія, що відповідають діапазону чисел Рейнольдса $Re < 650$.

4. Виявлено вплив ширини сегментів зигзагоподібних каналів на формування квазістаціонарних циркуляційних зон в куткових областях течії.

5. Показано, що система вставок всередині каналів дозволяє збільшити рівні теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносій для течій при малих числах Рейнольдса Re за рахунок збільшення втрат на тиск, необхідного для формування течії із заданою швидкістю.

6. Виявлено, що введення системи вставок різної геометрії в криволінійні канали при малих числах Рейнольдса ($Re < 30 \dots 40$) не призводить до збільшення рівня теплових потоків. У цьому діапазоні швидкостей втрати тиску пов'язані тільки зі зміною напрямку течії при обтіканні потоком вставок.

Практичне значення одержаних результатів. Всі методи розрахунку гідродинамічних і теплових полів і контролю точності чисельних результатів реалізовані у вигляді комп'ютерних програм і програмних комплексів. Основні результати досліджень можуть бути використані при конструюванні теплообмінників в енергетиці, РЕА різноманітного призначення, пристроїв у нанотехнологіях, в хімічних чіпах для створення нових матеріалів, речовин у хімічній і фармацевтичній промисловості.

Запропоновані результати і основні закономірності процесів теплообміну в рідинах частково використовуються до лекційних курсах “Чисельні методи в інформатиці”, “Математичні методи моделювання систем з розподіленими параметрами”, які читаються студентам теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, при виконанні студентами курсових і дипломних проектів.

Особистий внесок здобувача. Розробка пакету комп'ютерних програм, спрямованих на моделювання процесів теплопередачі із зовнішнього середовища в рідкий теплоносі; результати чисельного моделювання, контроль обчислень і тестові задачі були проведені здобувачем самостійно з урахуванням порад і рекомендацій наукового керівника. В опублікованих у співавторстві роботах автору дисертації належить аналіз стійкості простого явного методу розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь параболічного типу [6], чисельні моделювання теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносії у прямолінійному каналі з системою симетричних і несиметричних вставок [2][3][7][11][15], в зигзагоподібному каналі зі змінною шириною сегментів і різною геометрією вставок [1][5][8][9][12], розробка методики розрахунку енергетичної ефективності каналів різної геометрії [4][10][13][14]. Науковому керівнику д.ф.-м.н. Гуржію О.А. належить ідея досліджень, систематизація літературних джерел і обговорення одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XVI Міжнародному симпозіумі “Методи дискретних особливостей у задачах математичної фізики” (Харків-Херсон, 2013р.), Всеукраїнській науково-методичній конференції “Сучасні науково-методичні проблеми математики у вищій школі” (Національний університет харчових технологій, Київ, 2013р.), II Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми механіки” (КНУ ім. Тараса Шевченка, 2013р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції “Комп'ютерна гідромеханіка” (Інститут гідромеханіки НАНУ, Київ, 2014р.), XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в питаннях надзвичайних ситуаціях” (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, 2014р.), II Науково-практичній дистанційній конференції молодих учених і фахівців з розробки програмного забезпечення “Сучасні аспекти розробки програмного забезпечення” (НТУУ “КПІ”, Київ, 2015р.), Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання та чисельних методів” (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2015р.), XIV Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики” (НТУУ “КПІ”, 2016р.), Міжнародна конференція “Комп'ютерне моделювання в наукомістких технологіях” (Харківський національний університет ім. Н.В.Каразіна, 2016).

Результати досліджень доповідалися й обговорювалися на науковому семінарі “Сучасні проблеми механіки” (керівник д.ф.-м.н., проф. Я.О.Жук) КНУ ім. Тараса Шевченка (2016р.), республіканському семінарі (керівник академік НАНУ В.Т.Грінченко) Інституту гідромеханіки НАНУ (2016р.) і розширеному науковому семінарі (керівник д.т.н., проф. С.А.Лукьяненко) кафедри АПЕПС, НТУУ “КПІ” (2016р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 у виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз), 8 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 2 в інших виданнях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Вона містить 176 сторінок основного тексту, 107 рисунків і 2 таблиці. Список літератури містить 172 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, формулюється мета досліджень, розглядаються питання про наукову новизну, теоретичне і практичне значення, апробацію одержаних результатів, кількість публікацій.

У першому розділі наведено короткі історичні відомості розвитку мікропроцесорів, розглядаються особливості конструктивних можливостей тепловідведення на кристалах мікропроцесора, основні проблеми чисельного розв’язку задач гідромеханіки в наближенні малих чисел Рейнольдса і визначаються проблеми для подальших досліджень.

Одним із можливих технічних розв’язків проблеми надійного відведення електричної теплоти, що виділяється процесорами, є створення в підкладці кристала системи каналів, заповнених рідким теплоносієм. Нагрітий теплоносій по трубках може надходити в окремо винесений тепловідвід, який дозволить одержану теплоту передати в зовнішнє середовище. Для формування безперервного руху в такій системі відведення тепла необхідно підтримувати різницю тисків.

На даний час відомо декілька технологій виготовлення системи каналів у кристалах процесорів. Найбільш простим є технологія склеювання шарів підкладки, які містять систему каналів різної геометрії. Часто застосовується технологія травлення і наросування підкладки, яка дозволяє формувати не тільки канали різної геометрії, але і систему різних вставок, упорядковану шорсткість на окремих поверхнях та ін.

Аналіз теплових і гідродинамічних процесів у каналах показує, що в даній системі має місце два найбільш важливі механізми теплопередачі: молекулярна дифузія, викликана передачею тепла за рахунок броунівського руху, і конвективний перенос, викликаний передачею тепла за рахунок руху теплоносія в каналі. Якщо перший механізм, в основному, визначається фізичними параметрами матеріалу підкладки, теплоносія і поверхнею контакту, то другий механізм, крім фізичних параметрів зовнішнього середовища і теплоносія, може управлятися структурою течії в каналі. Основна увага в роботі приділена проблемі поліпшення процесів теплопередачі із зовнішнього твердого середовища в рідкий теплоносій за рахунок формування керованої і контрольованої течії всередині каналу.

Проблемою теплопередачі з рідкого теплоносія в зовнішнє середовище займалися багато вчених у нашій країні і за кордоном. Зокрема слід відзначити роботи О.Б.Аніпко, В.Т.Буглаєва, Л.П.Гоженко, А.А.Долінського, Д.Н.Письменого, Є.Н.Письменого, А.А.Халатова, М.Akbari, M.Favre-Marinet, M.R.Mackley, M.Miyazaki, K.D.P.Nigam, E.P.L.Roberts, Y.Sui, R.K.Thakur, C.Vial, P.Yang та ін. Зокрема, дослідження Н.П.Соколова показали, що охолоджувальні системи з компланарними каналами мають підвищені рівні теплопередачі в порівнянні з прямолінійним каналом. Збільшення швидкості течії теплоносія, введення в канал різних направляючих вставок призводить до помітного поліпшення термічних властивостей пристроїв теплопередачі різного призначення.

Відмінною особливістю охолоджувальних систем у пристроях РЕА є малі розміри поперечного перерізу каналів і малі швидкості течії рідини уздовж каналу. Іншими словами, у каналах формуються ламінарні течії. З технічної точки зору, конструктивна реалізація турбулентних течій всередині каналів зустрічає ряд труднощів, пов'язаних, у першу чергу, обмеженнями механічних властивостей матеріалу каналів і умовами їх експлуатації. Саме з цієї причини найбільший науковий і практичний інтерес сьогодні мають охолоджувальні системи, які працюють на мінімальних швидкостях, що відповідають числам Рейнольдса $Re < 1000$.

Відкриття Н.Агref (1984) явища хаотичної адвекції дозволило подивитися на проблему інтенсивного переносу поля температур гідродинамічними течіями з нових концептуальних позицій. У загальному випадку адвекція – фізичне явище, пов'язане з перенесенням різних скалярних полів (маси, температури, домішки та ін.) тільки за рахунок руху суцільного середовища. Головним досягненням стало те, що було показано, що навіть ламінарні потоки можуть формувати хаотичний режим руху окремих рідких частинок течії. При цьому в рідині виникають інтенсивні процеси перенесення маси, енергії. Так у світовій науковій літературі виник термін *хаотична адвекція*. Однак не всі ламінарні потоки мають таку властивість, і не у всій області течії хаотична адвекція має місце. Пошук течій і умов, при яких виникають режими хаотичної адвекції в рідинах, представляє сьогодні одну з важливих і складних задач гідромеханіки.

У своїх роботах К.В.Кошель, В.С.Мадеріч, В.В.Мелешко, S.Balachandar, B.E.Cremers, O.U.V.Fuentes, G.J.F. van Heijst, C.W.Leong, J.M.McGraw, J.M.Ottino, A.D.Stroock та ін. показали, що різні гідродинамічні системи можуть втрачати гідродинамічну стійкість у периферійній зоні локалізованих вихрових структур. У таких течіях мають місце квазістаціонарні точки. Встановлено, що в міру збільшення швидкості течії в областях, прилеглих до цих точок, починає формуватися нестійкість потоку, яка в кінцевому підсумку призводить до суттєвої інтенсифікації процесів переносу скалярних полів у гідродинамічних течіях різного масштабу.

У другому розділі розглядається двовірна задача конвективно-дифузійної теплопередачі від зовнішнього твердого середовища в рідкий теплоносіє.

Основними рівняннями, що описують гідродинамічні процеси всередині каналу і процеси теплопередачі, є рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності і рівняння переносу тепла:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{U}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (2)$$

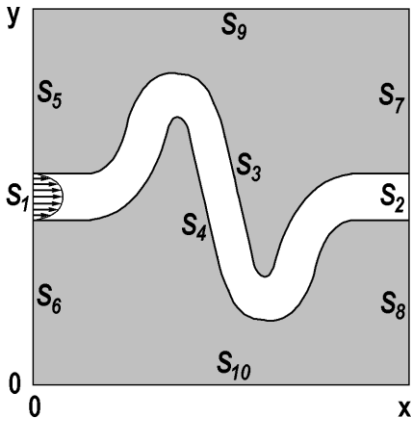


Рис.1. Геометрія задачі

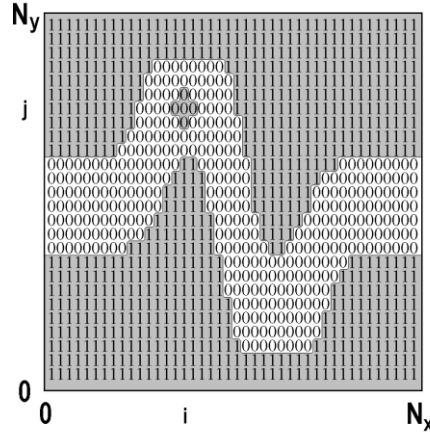


Рис.2. Приклад визначення каналу з довільною геометрією поверхонь, що обмежують

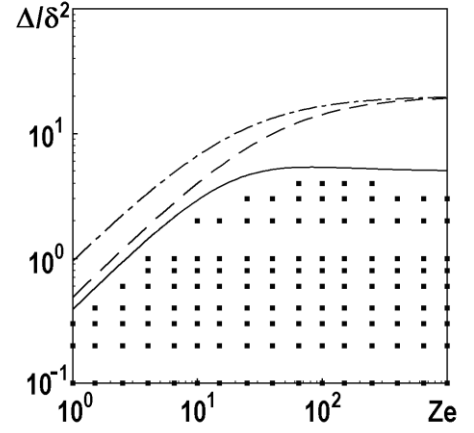


Рис.3. Умова стійкості простої явної схеми розв'язку нелінійного диференціального рівняння параболічного типу

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)T = \alpha \Delta T, \quad (3)$$

де $\mathbf{U}$ – поле швидкості, p – поле тиску, T – поле температур, ρ – густина рідини, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, α – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, ∇ – оператор Гамільтона, Δ – оператор Лапласа.

Накладання операції rot на рівняння (1) дозволяє одержати рівняння переносу завихреності ($\omega = \text{rot } \mathbf{U}$)

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)\omega = \nu \Delta \omega. \quad (4)$$

Надалі задачу (рис.1) зручно пронормувати на ширину (на вході) каналу D , максимальну швидкість течії на вході каналу U_0 , густину рідини ρ і різницю температур, $\Delta T = T_1 - T_0$, зовнішнього середовища на нескінченному віддаленні від каналу (T_1) і рідини на вході каналу (T_0), та γ_F – коефіцієнт теплопровідності рідини. У результаті отримуємо наступну систему безрозмірних величин:

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{D}, & y^* &= \frac{y}{D}, & t^* &= \frac{t U_0}{D}, & U^* &= \frac{U}{U_0}, & V^* &= \frac{V}{U_0}, \\ \Psi^* &= \frac{\Psi}{D U_0}, & \omega^* &= \frac{\omega D}{U_0}, & Q^* &= \frac{T - T_0}{\Delta T}, & W^* &= \frac{W D}{\gamma_F \Delta T}, & \gamma^* &= \frac{\gamma}{\gamma_F}. \end{aligned} \quad (5)$$

Надалі зірочки у безрозмірних величинах будуть опущені.

Таким чином, рівняння переносу завихреності, рівняння переносу тепла і рівняння Пуассона для тиску і функції току в розглянутій задачі в безрозмірній формі приймають, відповідно, вигляд:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial U \omega}{\partial x} + \frac{\partial V \omega}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \left\{ \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right\}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial U Q}{\partial x} + \frac{\partial V Q}{\partial y} = \frac{1}{\text{Pe}} \left\{ \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right\}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2 \left\{ \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \right\}, \quad (8)$$

де $U = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad V = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad \omega = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}.$

Тут $U(x,y,t)$, $V(x,y,t)$ – проекції поля швидкості, $Re = DU_0/\nu$ – число Рейнольдса, $Pe = Pr \cdot Re$ – число Пекле, де $Pr = \nu / \alpha$ – число Прандтля для заданого середовища.

Граничними умовами (рис.1) в задачі є

$$\omega|_{S_1} = 4(1-2y), \quad \omega|_{S_2} = \frac{4U_*}{D_*} \left(1 - \frac{2y}{D_*}\right), \quad \Psi|_{S_1} = 4y^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{y}{3}\right), \quad \Psi|_{S_2} = U_* \frac{4y^2}{D_*} \left(\frac{1}{2} - \frac{y}{3D_*}\right),$$

$$\Psi|_{S_3} = \Psi_3^*, \quad \Psi|_{S_4} = 0, \quad p|_{S_1} = \Delta p, \quad p|_{S_2} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_4} = 0 \quad (9)$$

$$Q_F|_{S_1} = 0, \quad Q_F|_{S_3} = Q_S|_{S_3}, \quad \left. \frac{\partial Q_F}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_3} = \gamma \left. \frac{\partial Q_S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_3}, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_3} = 0, \quad Q_F|_{S_4} = Q_S|_{S_4}, \quad Q_S|_{S_9} = 1,$$

$$Q_S|_{S_{10}} = 1, \quad \left. \frac{\partial Q_F}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_4} = \gamma \left. \frac{\partial Q_S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_4}, \quad \left. \frac{\partial Q_S}{\partial x} \right|_{S_5} = 0, \quad \left. \frac{\partial Q_S}{\partial x} \right|_{S_6} = 0, \quad \left. \frac{\partial Q_S}{\partial x} \right|_{S_7} = 0, \quad \left. \frac{\partial Q_S}{\partial x} \right|_{S_8} = 0.$$

де $D_* = D_2 / D_1$, $\Psi_3^* = 2/3$.

Інші граничні умови визначалися в процесі обчислення. В якості початкового розподілу полів приймається розподіл полів, одержаний у результаті розв'язку окремої стаціонарної задачі течії в'язкої нестисливої рідини для заданих граничних умов (9).

Задача розв'язувалась чисельно на рівномірній сітці з кроком просторової дискретизації δ і кроком Δ за часовою змінною. Геометрія каналу задавалася в окремому файлі (рис.2) з позначеннями: “0” – вузол належить каналу, “1” – вузол відноситься до зовнішнього твердого середовища.

Введемо позначення індексів вузлів обчислювальної сітки

$$\omega(x, y, t) = \omega(i\delta, j\delta, n\Delta) \equiv \omega_{i,j}^n, \quad \Psi(x, y, t) = \Psi(i\delta, j\delta, n\Delta) \equiv \Psi_{i,j}^n,$$

$$U(x, y, t) = U(i\delta, j\delta, n\Delta) \equiv U_{i,j}^n, \quad V(x, y, t) = V(i\delta, j\delta, n\Delta) \equiv V_{i,j}^n, \quad (10)$$

$$p(x, y, t) = p(i\delta, j\delta, n\Delta) \equiv p_{i,j}^n.$$

Для розв'язку рівнянь (6), (7) параболічного типу використовувалася проста явна схема другого порядку точності по просторових координатах і першого порядку точності за часом скінченних різниць проти потоку

$$F_{i,j}^{n+1} = (1-4\beta)F_{i,j}^n - \beta^*(A_{i,j}^n + B_{i,j}^n) + \beta(F_{i+1,j}^n + F_{i-1,j}^n + F_{i,j+1}^n + F_{i,j-1}^n), \quad (11)$$

де $A_{i,j}^n = \begin{cases} U_{i,j}^n F_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n F_{i-1,j}^n & \text{при } U_{i,j}^n \geq 0, \\ U_{i+1,j}^n F_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n F_{i,j}^n & \text{при } U_{i,j}^n < 0, \end{cases}$ $B_{i,j}^n = \begin{cases} V_{i,j}^n F_{i,j}^n - V_{i,j-1}^n F_{i,j-1}^n & \text{при } V_{i,j}^n \geq 0, \\ V_{i,j+1}^n F_{i,j+1}^n - V_{i,j}^n F_{i,j}^n & \text{при } V_{i,j}^n < 0, \end{cases}$

$$F(x, y, t) = \{\omega(x, y, t), Q(x, y, t)\}, \quad Ze = \{Re, Pe\}, \quad \beta = \frac{\Delta}{\delta}, \quad \beta^* = \frac{\Delta}{\delta^2 Ze}.$$

Метод послідовної верхньої релаксації застосовувався для розв'язку рівнянь еліптичного типу (8),

$$R_{i,j}^{(k+1)} = R_{i,j}^{(k)} (1 - \lambda) + \frac{\lambda}{4} [R_{i+1,j}^{(k)} + R_{i-1,j}^{(k)} + R_{i,j+1}^{(k)} + R_{i,j-1}^{(k)} - G_{i,j} \delta^2], \quad (12)$$

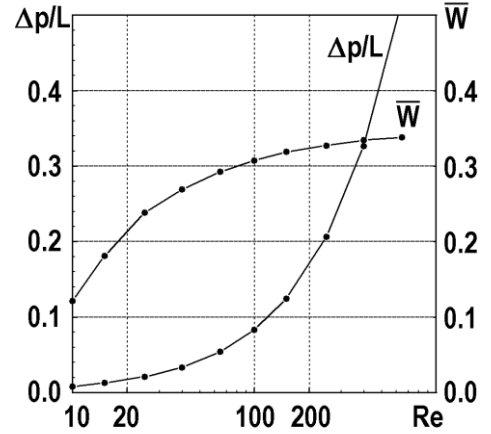
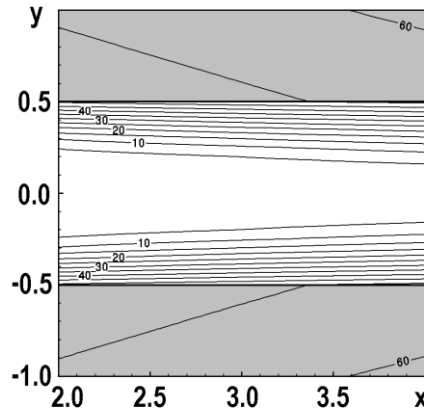
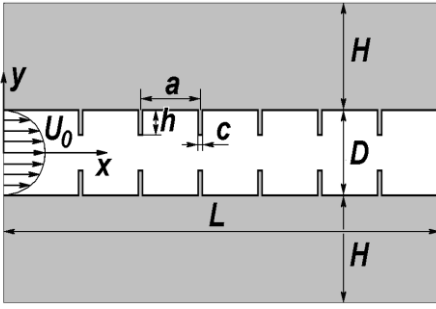


Рис.4. Геометрія прямолінійного каналу зі вставками

Рис.5. Розподіл $Q(x,y)$ всередині прямолінійного каналу без вставок при $Re = 65$

Рис.6. Залежність $\Delta p/L$ і $\bar{W}$ від чисел Рейнольдса Re в прямолінійному каналі без вставок

де $R(x, y, t) = \{\Psi(x, y, t), p(x, y, t)\}$, $G = \left\{ -\omega, 2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\}$.

Де λ – параметр релаксації, $1.0 < \lambda < 2.0$.

Чисельна схема називається стійкою, якщо будь-яке збудження $\varepsilon = \varepsilon_{i,j}^n$, внесене у вузол (i, j) схеми, на кожній наступній ітерації інтегрування задовільняє умові

$$|\varepsilon_{i,j}^{n+1} / \varepsilon| \leq 1. \quad (13)$$

Аналіз стійкості простого явного методу (11) дозволив одержати залежність відношення Δ / δ^2 від значень чисел Рейнольдса Re (рис.3). Штриховими лініями нанесені обмеження, які виникають на наступному $(n + 1)$ часовому шарі для різних вузлів шаблону схеми, а суцільною лінією показано найжорсткіше обмеження, яке може виникнути на $(n + 2)$ часовому шарі. Кружечками на рисунку показані стійкі режими роботи простої явної схеми.

Тестування чисельної схеми розв'язку задачі було проведено на аналітичних розв'язках стаціонарної гідродинамічної задачі ламінарної течії в'язкої нестисливої рідини всередині прямолінійного каналу без вставок і одновимірної нестаціонарної задачі дифузійного поширення тепла в однорідній стінці кінцевого розміру. Порівняння даних дозволяє зробити висновок, що проста явна схема для розв'язку диференціальних рівнянь параболічного типу і метод послідовної верхньої релаксації для розв'язку диференціальних рівнянь еліптичного типу з хорошою точністю описує фізичні поля в області чисел Рейнольдса $Re < 1000$.

У третьому розділі представлені результати аналізу теплових потоків всередині прямолінійного каналу зі вставками різної геометрії.

Розглянемо конвективно-дифузійні процеси теплопередачі на кремнієвій підкладці з розмірами $W \times L$, ($W = 2H + D$), всередині якої є прямолінійний канал (рис.4) шириною D , заповнений водою. Усередині каналу може перебувати система симетричних і несиметричних вставок висотою h , з шириною c , які розташовані на відстані a відносно один одного. У цьому випадку нормовані параметри приймають наступні значення: $L = 18$, $W = 25$, $\gamma = 23.5$, $Pr_F = 7.0$ (для рідини), $Pr_S = 0.33$ (для твердого середовища). Надалі аналіз структури течії і рівнів теплових потоків у каналі проводився тільки при досягненні стаціонарних (або квазістаціонарних) режимів.

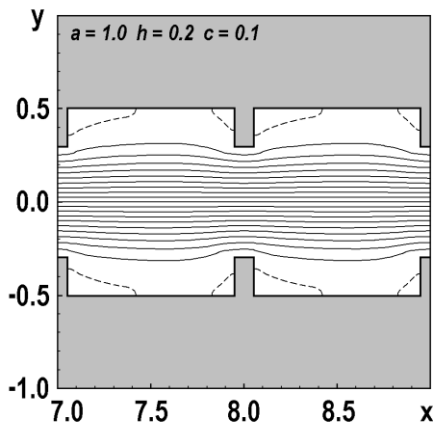


Рис.7. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу зі вставками $h = 0.2$ при $Re = 150$

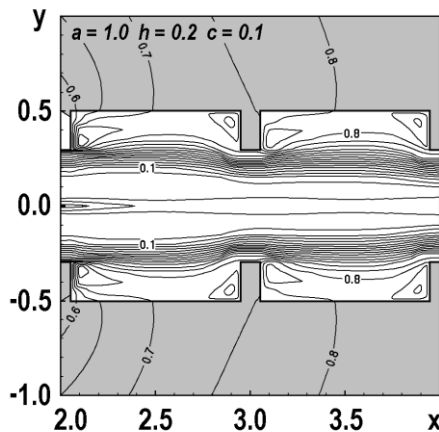


Рис.8. Розподіл $Q(x,y)$ всередині каналу зі вставками $h = 0.2$ при $Re = 150$

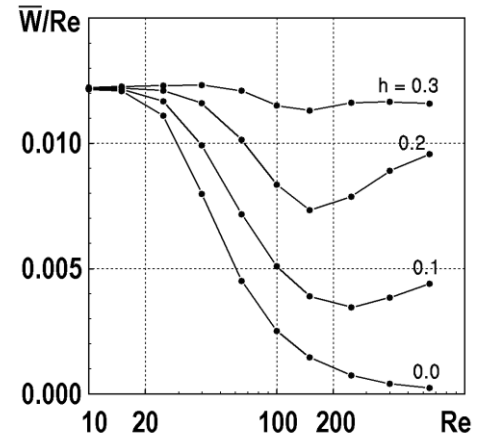


Рис.9. Залежність $\bar{W}$ в прямолінійному каналі зі вставками від значень Re

У діапазоні чисел Рейнольдса $Re < 650$ наявність тільки поздовжньої складової поля швидкості течії рідини призводить до того, що мінімальне значення поля температури $Q(x, y)$ у теплоносії встановлюється на осі каналу (рис.5). Значення температури в рідині поступово збільшується в міру наближення до границь течії. На рис.6 зображена залежність усередненого за довжиною каналу теплового потоку $\bar{W}$ від швидкості течії теплоносія.

Залежність усередненого за всією довжиною каналу різниці тисків $\Delta p = p_1 - p_0$ між входом і виходом каналу, віднесеної до довжини L каналу для різних значень чисел Рейнольдса Re показана на рис.6. У розглянутому діапазоні швидкостей течії встановлюється в першому наближенні лінійна залежність значень $\Delta p/L$ від поздовжньої швидкості теплоносія. Такий результат знаходиться в хорошому співвідношенні відповідно до даних, опублікованих у літературі.

У роботі для формування поперечного конвективного теплового потоку в каналі пропонується використовувати систему вставок, розташовану на границі течії (рис.1). Поява системи симетричних вставок призводить до зменшення його ефективної ширини. На рис.7 показано розподіл функції току $\Psi(x,y)$ для вставок висотою $h = 0.2$. Видно, що в течії перед вставками і за ними утворюються циркуляційні зони (відзначені на рисунку штриховою лінією). Характерною особливістю циркуляційних зон течії є приблизно на порядок менші значення компонент швидкостей течії в порівнянні зі швидкістю зовнішнього потоку.

Розподіл поля температур $Q(x,y)$ у розглянутій течії показано на рис.8, на якому нанесені ізотерми з кроком дискретизації $\Delta Q = 0.05$. Аналіз даних показує, що при малих числах Рейнольдса Re відбувається більш інтенсивний прогрів осьової частини течії каналу в порівнянні з каналом без вставок, що призводить до інтенсифікації конвективних теплових потоків у каналі. Введення системи симетричних вставок дозволяє збільшити тепловий потік крізь бічні поверхні каналу (рис.9) за рахунок збільшення втрат на тиск, необхідного для формування течії із заданою швидкістю.

Зменшення відстані між вставками призводить до появи циркуляційних зон у кутових областях течії при менших значеннях чисел Рейнольдса. Зі збільшенням швидкості течії вони поступово заповнюють простір між вставками (рис.10). При цьому дифузійні ефекти в рідині встигають вирівняти профіль поля температур в осьовій ча

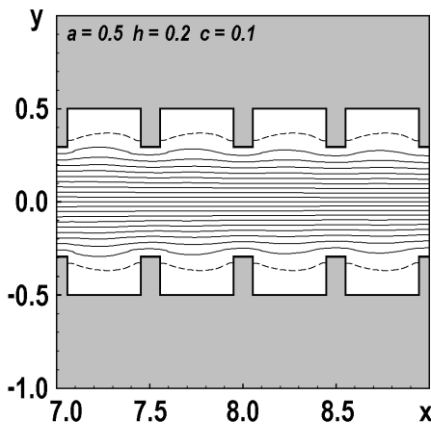


Рис.10. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу зі вставками при $a = 0.5$, $Re = 150$

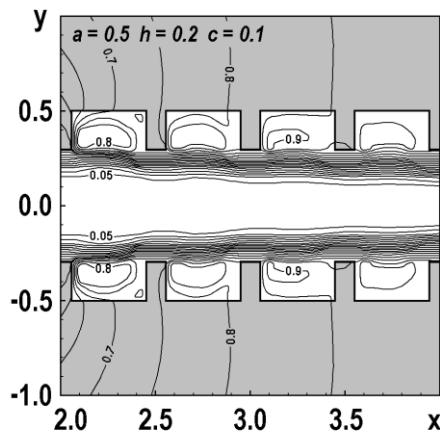


Рис.11. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі зі вставками при $a = 0.5$, $Re = 150$

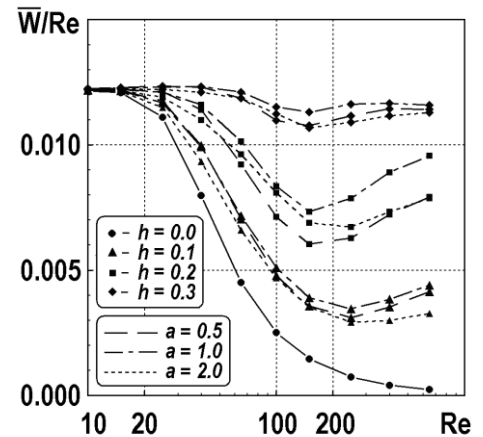


Рис.12. Залежність $\bar{W}$ крізь границі течії зі вставками різної геометрії від значень Re

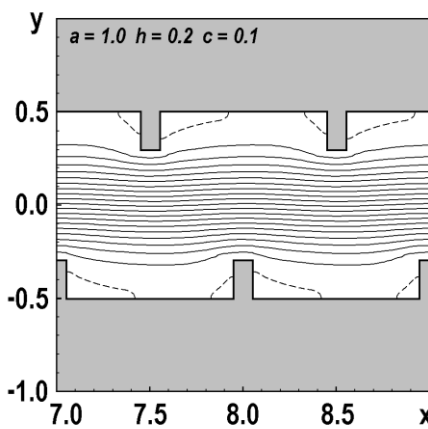


Рис.13. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу з несиметричними вставками при $Re = 150$

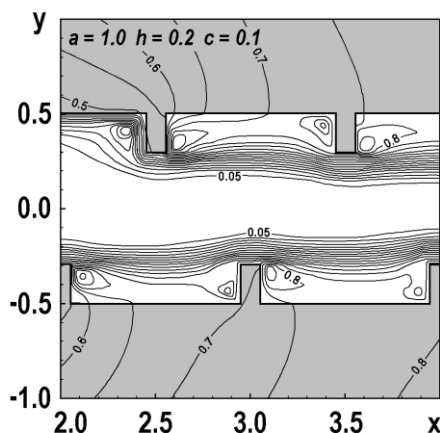


Рис.14. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі з несиметричними вставками при $Re = 150$

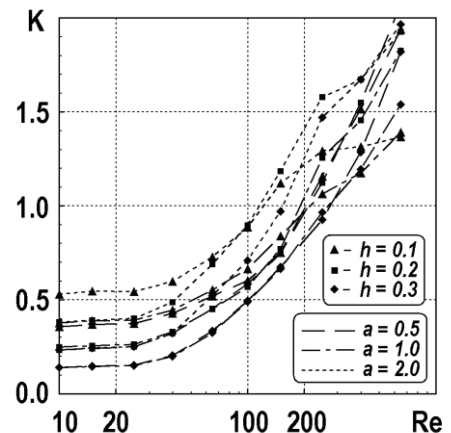


Рис.15. Залежність коефіцієнта відносної ефективності для каналу з симетричними вставками від значень Re

стині каналу за час, протягом якого теплоносій протікає крізь канал. Частина вставок, яка утворює систему локалізованих вихрових структур за вставками, сприяє процесу вирівнювання поля температур у перерізі каналу (рис.11).

Дослідження показали, що при малих числах Рейнольдса ($Re < 30 \dots 40$) введення вставок у канал не призводить до помітного збільшення рівня теплових потоків

(рис.12). Втрати на тиск у цьому випадку йдуть на зміну напрямку течії при обтіканні потоком вставок. Видно, що зі збільшенням відстані між вставками до $a = 1.0$ рівні теплових потоків каналу збільшуються на 5-10% для висоти вставок $h = 0.3$ у порівнянні з каналом без вставок. Аналогічні значення для вставок $h = 0.2$ складають 10-25%, для вставок $h = 0.1$ рівні теплових потоків збільшуються на 5-10%. Важливо, що канал зі вставками при $a = 2.0$, допускає зменшення на 50-60% різниці тиску Δp для забезпечення заданої швидкості рідини в порівнянні з випадками $a = 0.5$ і 1.0 .

Якщо в канал ввести систему несиметричних вставок, симетрія течії рідини порушується (рис.13). У потоці за вставками і перед ними утворюються циркуляційні зони, які сприяють збільшенню рівнів теплових потоків із зовнішнього твердого середовища в теплоносій (рис.14). Порівняльний аналіз чисельних значень показує, що залежності $\Delta p(Re)$ і $\bar{W}(Re)$ мають мало відмінностей у порівнянні з аналогічними залежностями для каналів із системою симетричних вставок (рис.9 і 12).

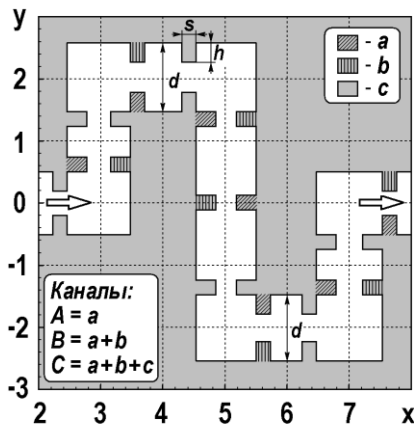


Рис.16. Геометрія зигзагоподібного каналу

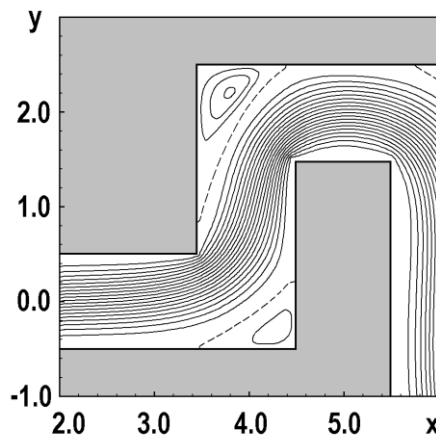


Рис.17. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу без вставок при $Re = 150$

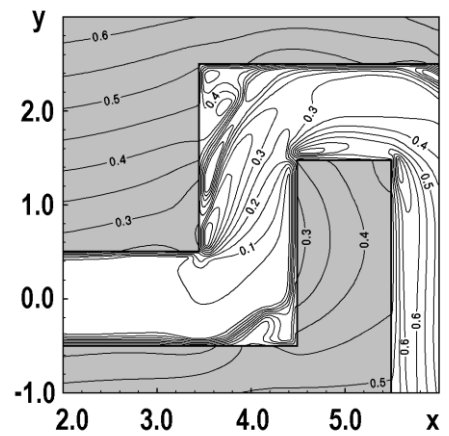


Рис.18. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі без вставок при $Re = 150$

Для визначення ефективності запровадження системи вставок у прямолінійний канал введемо параметр, який дорівнює відношенню збільшення величини усередненого теплового потоку $\bar{W}$ у каналі зі вставками до збільшення усереднених втрат на тиск Δp по відношенню до відповідних гідродинамічних і теплових параметрів ($\bar{W}_0$ і Δp_0) течії в прямолінійному каналі без вставок

$$k = \frac{\bar{W} / \bar{W}_0}{\Delta p / \Delta p_0}. \quad (14)$$

На рис.15 видно, що система вставок стає ефективною для значень чисел Рейнольдса $Re > 150 \dots 200$. У цьому діапазоні збільшення рівня теплових потоків у каналі перевищує збільшення різниці тисків, що докладаються до каналу. При цьому найкращий варіантом є канал при $h = 0.2$ для різних значень відстаней між вставками.

У четвертому розділі проводиться аналіз гідродинамічних параметрів течії всередині криволінійного каналу (рис.16) аналогічної довжини ($L = 18$) і процесу теплопередачі із зовнішнього середовища в теплоносії. У роботі розглядається канал з параметрами, аналогічними прямолінійним каналу, розглянутому раніше.

При малих значеннях чисел Рейнольдса в каналі формується течія, яка характеризується плавним обтіканням кутових областей каналу. При збільшенні швидкості рідини починають з'являтися циркуляційні зони (рис.17) різної площі у внутрішніх кутах каналу. На рис.18 показано розподіл поля температур $Q(x,y)$ в області, прилеглих до входу каналу при досягненні стаціонарного режиму течії. Видно, що максимальний градієнт поля температур з'являється близько поверхонь, до яких основний потік наближається за інерцією. Зі збільшенням швидкості течії рідини циркуляційні зони переходять від стаціонарного до квазістаціонарного режиму, який характеризується поперемінним захопленням холодної рідини з основної течії й одночасним видавлюванням нагрітої рідини до осевого потоку. Це призводить до додаткового теплового потоку, викликаного конвекцією теплоносія всередині каналу.

У каналі A структура і розміри циркуляційної зони в першому куті каналу практично не відрізняються від відповідної зони в каналі без вставок (рис.19). Однак розміри наступних зон у каналі помітно перевищують розміри циркуляційних зон у каналі без вставок. Дифузійні ефекти в рідині поступово вирівнюють поле температур всередині

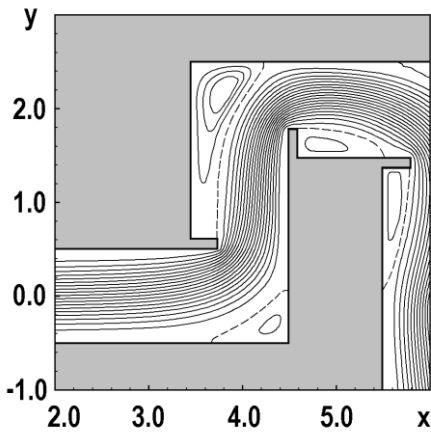


Рис.19. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу A при $Re = 150$

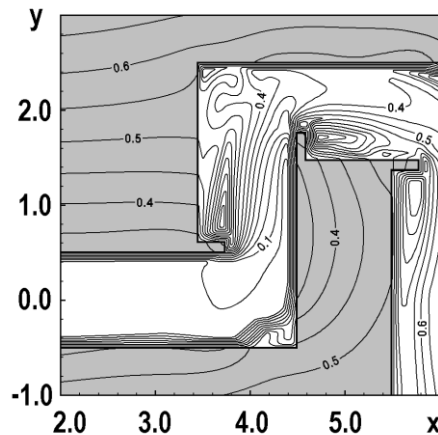


Рис.20. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі A при $Re = 150$

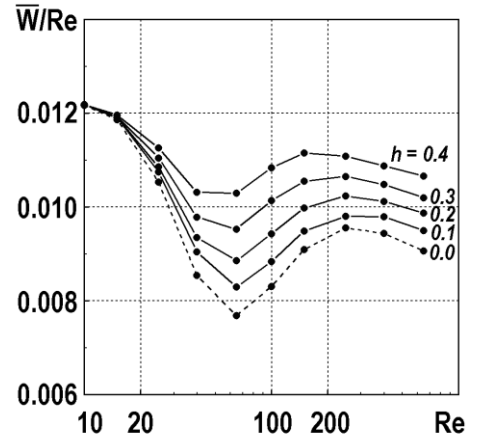


Рис.21. Залежність $\bar{W}$ крізь границі каналу A з різними висотами вставок від значень Re

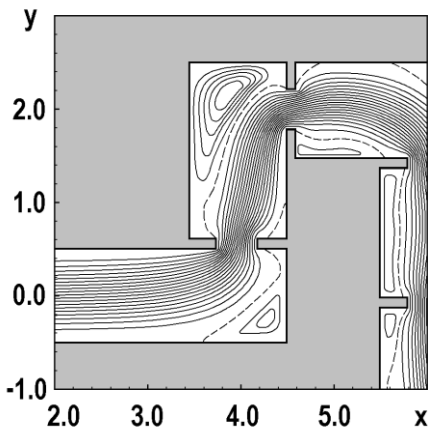


Рис.22. Розподіл $\Psi(x,y)$ всередині каналу B зі вставками $h = 0.3$ при $Re = 150$

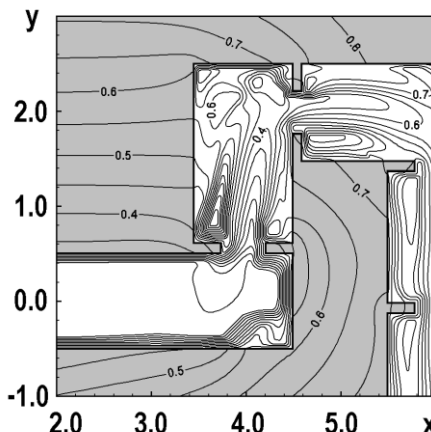


Рис.23. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі B зі вставками $h = 0.3$ при $Re = 150$

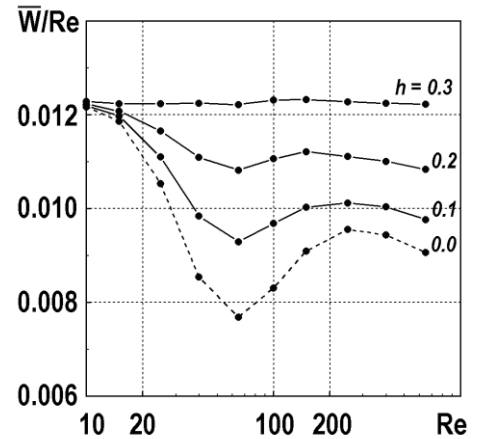


Рис.24. Залежність $\bar{W}$ крізь границі каналу B з різними висотами вставок від значень Re

каналу (рис.20). Можна помітити загальну тенденцію (рис.21): зі збільшенням швидкості теплоносія в зигзагоподібному каналі теплоносії нагрівається значно швидше.

На рис.22 показано розподіл функції току всередині каналу B із системою симетричних вставок. Виявлено, що зі збільшенням висоти вставок розміри циркуляційних зон збільшуються і можуть займати практично всю область границь між вставками. При цьому помітно зменшується ефективна ширина каналу. Одночасно, квазістаціонарність кутових циркуляційних зон призводить до виносу частини нагрітої рідини в осьову течію. Усе це призводить до досить інтенсивного вирівнювання поля температур всередині зигзагоподібного каналу (рис.23).

На рис.24 показана залежність усередненого по довжині каналу рівня теплового потоку $\bar{W}$ із зовнішнього середовища в теплоносії від значень числа Рейнольдса Re для різних висот вставок в каналі B. Видно, що зі збільшенням висоти вставок рівень теплового потоку збільшується. Найбільший ефект досягається при $Re = 40 \dots 100$.

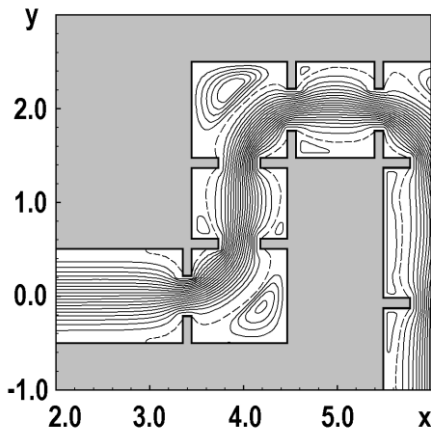


Рис.25. Розподіл $\Psi(x,y)$ в каналі C при $Re = 150$

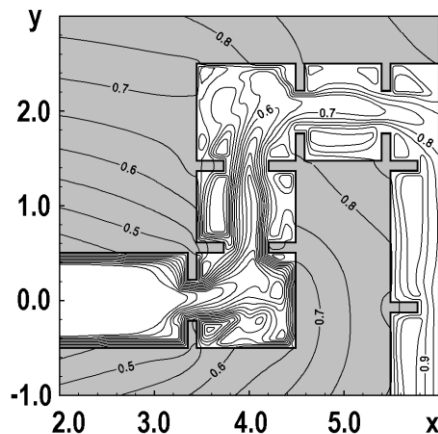


Рис.26. Розподіл $Q(x,y)$ в каналі C при $Re = 150$

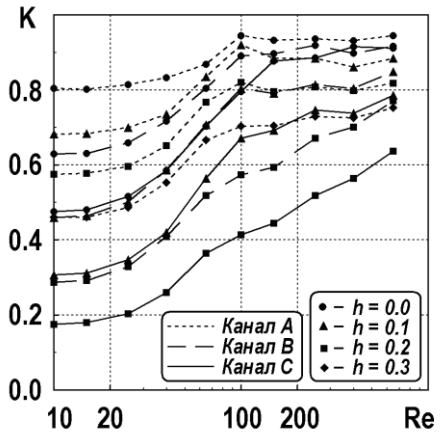


Рис.27. Залежність коефіцієнта відносної ефективності для зигзагоподібних каналів від значень Re

Наприклад, при значенні числа Рейнольдса $Re = 65$ рівень теплового потоку приблизно на 60% більше в порівнянні з аналогічним каналом без вставок.

Збільшення числа вставок у каналі C призводить до формування циркуляційних зон при менших числах Рейнольда Re . Система вставок у каналі C значно змінює структуру поля течії. Циркуляційні зони в каналі C швидше досягають квазістаціонарного режиму в міру збільшення швидкості осьового потоку в порівнянні з іншими каналами. Цікаво відзначити, що при великих числах Рейнольдса Re всередині осьової течії мають місце області з температурами в широкому діапазоні значень (рис.26). Однак, у міру просування рідини вздовж каналу діапазон температур у теплоносії поступово зменшується, а температура рідини поступово вирівнюється. Це призводить до формування більшого градієнта поля температур близько поверхонь, що обмежують, і, як результат, до високих значень теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносії.

На рис.27 показана залежність коефіцієнта відносної ефективності зигзагоподібних каналів зі вставками по відношенню до каналу без вставок. Видно, що для всіх видів каналів і геометрії вставок значення K менше одиниці. Це означає, що збільшення втрат на тиск у зигзагоподібному каналі перевищують відповідне збільшення рівнів теплових потоків крізь поверхні, що обмежують. Цікаво відзначити, що з енергетичної точки зору система вставок малої висоти є більш ефективною в порівнянні з каналами, що містять великі ($h > 0.1$) вставки, через істотне зменшення ефективної ширини перерізу криволінійного каналу.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи було вирішено ряд важливих науково-технічних питань, а саме розроблено алгоритм розв'язку задачі переносу тепла із зовнішнього нагрітого середовища в холодний теплоносії для каналу з довільною геометрією поверхонь, що обмежують, у наближенні малих чисел Рейнольдса Re . Одержана кількісна залежність рівнів теплових потоків крізь границі криволінійних каналів зі вставками і різниці тисків на вході і виході каналів від швидкості течії теплоносія. Встановлено вплив ширини сегментів зигзагоподібних каналів на формування

квазістаціонарних циркуляційних зон в кутових областях течії. Визначено геометричні параметри вставок, при яких досягаються найбільші рівні теплових потоків крізь обмежуючі поверхні криволінійних каналів.

За результатами дисертаційної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Чисельно розв'язана задача переносу тепла із зовнішнього нагрітого середовища в криволінійний канал, заповненого однорідною в'язкою нестисливою рідиною, у термінах “функція току – завихреність” у безрозмірному вигляді в наближенні малих чисел Рейнольдса Re . Її розв'язок зводиться до одночасного розв'язку рівнянь переносу завихреності, переносу тепла і рівняння Пуассона для функції току з відповідними початковими і граничними умовами.

2. Показано, що простий явний метод розв'язку нелінійних рівнянь переносу завихреності і переносу тепла має обмеження на крок дискретизації за часом, виконання якого забезпечує стійкі обчислення на рівномірній просторовій сітці. Тестування на двовимірній гідродинамічній задачі стаціонарної ламінарної течії в'язкої нестисливої рідини всередині прямолінійного каналу без вставок і одновимірної нестаціонарної задачі теплопередачі від нагрітої стінки до холодної стінки свідчить про хороший збіг чисельних результатів і аналітичних розв'язків, представлених у науковій літературі.

3. Одержана кількісна залежність рівнів теплових потоків крізь границі криволінійних каналів зі вставками різної геометрії (висота, ширина, відстань між вставками для симетричного і несиметричного їх слідування) і різниці тисків на вході і виході прямолінійного і зигзагоподібного каналів від швидкості ламінарної течії теплоносія в діапазоні чисел Рейнольдса $Re = 10 \dots 650$.

4. Виявлено, що введення системи вставок різної геометрії в канали при малих числах Рейнольдса ($Re < 30 \dots 40$) не призводить до збільшення рівня теплових потоків. У цьому випадку втрати на тиск пов'язані тільки зі зміною напрямку течії при ламінарному обтіканні вставок потоком.

5. Показано, що система вставок усередині каналів дозволяє збільшити рівні теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносії у порівнянні з каналами без вставок в області чисел Рейнольдса $Re = 200 \dots 650$. При цьому відносний коефіцієнт ефективності каналів (у порівнянні з прямолінійним каналом без вставок однакової довжини) може досягати значень $k = 1.10 \dots 1.40$.

6. Встановлено, що в кутових областях перед вставками і за ними утворюються стаціонарні (або квазістаціонарні) циркуляційні зони і система локалізованих вихрових структур, які вирівнюють поле температур у поперечному перерізі каналу і значно збільшують питомі теплові потоки крізь границі течії за рахунок збільшення втрат на тиск, необхідний для формування течії із заданою швидкістю.

7. Визначено геометричні параметри вставок, при яких досягаються найбільші рівні теплових потоків крізь обмежуючі поверхні криволінійних каналів для ламінарної течії теплоносія в області чисел Рейнольдса $Re = 100 \dots 250$: вузькі вставки ($c \approx 0.1D$) помірної висоти ($h \approx 0.2D$), розташовані на відстані близько ширини каналу ($a \approx D$).

8. Встановлено, що теплові потоки в каналах з системою несиметричних і симетричних вставок фактично не відрізняються один від одного за рівністю геометрії вставок, загальної довжини каналу і гідродинамічного режиму течії теплоносія. Не дивлячись на те, що канал із системою несиметричних вставок має більший середній

ефективний перетин, втрати на тиск у ньому виявляються вищими за рахунок формування несиметричної ламінарної течії всередині каналу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гуржий А.А. Анализ процессов теплопередачи в криволинейных микроканалах, заполненных вязкой несжимаемой жидкостью / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Восточно-европейский журнал передовых технологий.– 2015. – Т.78, N.6/8. – с.41-49. (входит до НМБ SCOPUS) DOI:10.15587/1729-4061.2015.55508

Здобувачем виконано моделювання процесів теплопередачі в криволінійних мікроканалах, проведено аналіз значень рівнів теплових потоків із зовнішнього твердого середовища в теплоносії у зігзагоподібному мікроканалі при зміні ширини сегментів у діапазоні значень чисел Рейнольдса, відповідної ламінарної течії нестисливої рідини.

2. Шалденко А.В. Анализ процессов теплопереноса в прямолинейном канале со вставками при малых числах Рейнольдса / А.В.Шалденко, А.А.Гуржий // Прикладная гидромеханика. – 2015. – Т.17, N.3. – с.55-66.

Автором дисертації проведено чисельне моделювання процесів теплопередачі в прямолінійному каналі з системою симетричних і несиметричних вставок, встановлені основні закономірності впливу геометрії вставок на рівні усереднених теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносії.

3. Гуржий А.А. Анализ вихрей Моффатта внутри прямолинейного канала со вставками при малых числах Рейнольдса / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Вісник Харківського національного університету, серія “Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління”. – 2016. – Вип.30. – с.48-58.

Автором дисертації проведено аналіз параметрів і умов виникнення вихорів Моффатта всередині прямолінійного каналу зі вставками, заповненого в'язкою нестисливою рідиною.

4. Гуржий А.А. Численное моделирование процессов теплопередачи в микроканалах сложной геометрии при ламинарном течении вязкой жидкости / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Прикладная гидромеханика. – 2016. – Т.18, N.2. – с.33-46.

Здобувачем проведено аналіз ефективності процесів теплопередачі в криволінійних мікроканалах зі вставками при малих числах Рейнольдса.

5. Гуржий А.А. Процессы переноса скалярных полей в течениях вязкой жидкости в криволинейных трубах в приближении Дина / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Вісник Харківського національного університету, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2013. – N.1058, сер. 21. – с.20-28.

Автором дисертації проведено аналіз процесів переносу скалярних полів у криволінійних трубах у наближенні Діна. Встановлено геометричне положення областей інтенсивного перенесення скалярних полів у поперечному перерізі криволінійних труб в наближенні малих чисел Рейнольдса.

6. Шалденко О.В. Аналіз стійкості простої явної схеми численного розв'язку параболічних рівнянь у гідромеханіці / Шалденко О.В. // Наук. Збірник “Сучасні аспекти розробки програмного забезпечення”, К.: НТУУ “КПІ”, 2015 – с.88-91.

Здобувачем виконано аналіз стійкості простого явного методу розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь із частковими похідними параболічного типу на основі методу дискретних збуджень.

7. Гуржий А.А. Анализ интенсивных режимов переноса скалярных полей ламинарными течениями / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Труды XVI Международного симпозиума “Методы дискретных особенностей в задачах математической физики”, Харьков-Херсон, 10-15 июня, 2013. – с.143-146.

Здобувачем встановлені основні закономірності процесів переносу скалярних полів ламінарними течіями.

8. Гуржий А.А. Идентификация интенсивных областей адвекции жидкости ламинарными течениями в криволинейных трубах / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко // Всеукраїнська наукова-методична конференція “Сучасні науково-методичні проблеми математики у вищій школі”, Національний університет харчових технологій, Київ, 26-27 червня, 2013. – с.29-31.

Автором дисертації проведено моделювання процесів переносу скалярних полів у криволінійних трубах при ламінарній течії в'язкої нестисливої рідини.

9. Гуржий А.А. Моделирование процессов переноса в плоских течениях со сложной геометрией границ / А.А.Гуржий, А.В.Шалденко, Д.Ю.Мацола // Міжнародна наукова конференція “Сучасні проблеми математичного моделювання та числювальних методів”, Рівне, 19-22 лютого, 2015. – с.199.

Автором дисертації проведено моделювання процесів адвекції виділеної рідини в течіях з криволінійними границями, встановлено основні закономірності процесів переносу виділеної рідини ламінарними течіями в криволінійних трубах у наближенні малих чисел Рейнольдса.

10. Шалденко А.В. Тепловые процессы при ламинарном течении жидкости в каналах с различной геометрией ограничивающих поверхностей" / А.В.Шалденко, А.А.Гуржий // IV Международная научно-практическая конференция “Компьютерная гидромеханика”, Киев, 30 сентября - 1 октября, 2014. – с.38-39.

Дисертантом проведено чисельний аналіз теплових потоків у каналах із різною геометрією обмежуючих поверхонь, встановлено вплив циркуляційних зон на рівні теплових потоків у теплообміннику з системою вставок різної геометрії в течії при малих числах Рейнольдса.

11. Шалденко А.В. Анализ тепловых потоков при ламинарном течении теплоносителя в криволинейных каналах / А.В.Шалденко, А.А.Гуржий // XIII Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”, Київ, 29 сентября - 3 октября, 2014. – с.9-11.

Здобувачем проведено аналіз процесів теплопередачі із зовнішнього твердого середовища в рідкий теплоносій для криволінійного каналу в наближенні малих чисел Пекле.

12. Шалденко О.В. Моделирование процессов переносу теплоих полів у зигзагоподібних мікроканалах / О.В.Шалденко, О.А.Гуржий // XIV Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів “Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”, НТУУ “КПІ”, 19-22 квітня 2016. – с.161.

Дисертантом проведено чисельний аналіз теплових потоків у зигзагоподібних мікроканалах зі вставками в наближенні малих чисел Рейнольдса.

13. Шалденко А.В. Моделирование процессов теплообмена в зигзагообразных каналах при малых числах Рейнольдса / А.В.Шалденко, А.А.Гуржий // Международная

конференция “Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях”, Харьков, май 27-31, 2016. – с.337-340.

Здобувачем проведено аналіз ефективності процесів теплообміну в каналах зі складною геометрією обмежуючих поверхонь.

14. Шалденко О.В. Аналіз процесів теплопередачі в криволінійному каналі при малих числах Рейнольдса / О.В.Шалденко, О.А.Гуржій // Вісник Київського університету. – 2015. – N.3. – с.39-42.

Дисертантом запропонована методика розрахунку енергетичної ефективності каналів зі складною геометрією поверхонь, що обмежують, отримана кількісна залежність рівнів теплових потоків крізь границі каналів і різниці тисків на вході і виході каналів від швидкості течії теплоносія.

15. Гуржій О.А. Інтенсивні режими адвекції виділеної рідини в течії Дина / О.А.Гуржій, О.В.Шалденко // Вісник Київського університету. – 2013. – N.3. – с.124-127.

Дисертантом реалізовано чисельне моделювання інтенсивних режимів переносу виділеної рідини в криволінійних трубах.

АНОТАЦІЯ

Шалденко О.В. Гідродинаміка і теплообмін у каналах зі вставками складної форми в системах тепловідводу РЕА. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, Київ, 2017.

У роботі чисельно розв’язана задача переносу тепла із зовнішнього нагрітого середовища в криволінійний канал, заповненого однорідною в'язкою нестисливою рідиною, у термінах “функція току – завихреність” у безрозмірному вигляді в наближенні малих чисел Рейнольдса Re . Її розв’язок зводиться до одночасного розв’язку рівнянь переносу завихреності, переносу тепла і рівняння Пуассона для функції току з відповідними початковими і граничними умовами.

Показано, що простий явний метод розв’язку нелінійних рівнянь переносу завихреності переносу тепла має обмеження на крок дискретизації за часом, виконання якого забезпечує стійкі обчислення на рівномірній просторовій сітці. Тестування на двовимірній гідродинамічній задачі стаціонарної ламінарної течії в'язкої нестисливої рідини всередині прямолінійного каналу без вставок і одновимірної нестационарної задачі теплопередачі від нагрітої стінки до холодної стінки свідчить про хороший збіг чисельних результатів і аналітичних розв’язків, представлених у науковій літературі.

У роботі одержано кількісну залежність рівнів теплових потоків крізь границі криволінійних каналів зі вставками різної геометрії (висота, ширина, відстань між вставками для симетричного і несиметричного їх слідування) і різниці тисків на вході і виході прямолінійного і зигзагоподібного каналів від швидкості ламінарної течії теплоносія в діапазоні чисел Рейнольдса $Re = 10 \dots 650$.

Показано, що система вставок всередині каналів дозволяє збільшити рівні теплових потоків із зовнішнього середовища в теплоносії у порівнянні з каналами без вставок в області чисел Рейнольдса $Re = 200 \dots 650$. При цьому відносний коефіцієнт

ефективності каналів (у порівнянні з прямолінійним каналом без вставок однакової довжини) може досягати значень $k = 1.10 \dots 1.40$. В кутових областях перед вставками і за ними утворюються стаціонарні (або квазістаціонарні) циркуляційні зони і система локалізованих вихрових структур.

У роботі визначено геометричні параметри вставок, при яких досягаються найбільші рівні теплових потоків крізь обмежуючі поверхні криволінійних каналів для ламінарної течії теплоносія в області чисел Рейнольдса $Re = 100 \dots 250$: вузькі вставки ($c \approx 0.1D$) помірної висоти ($h \approx 0.2D$), розташовані на відстані близько ширини каналу ($a \approx D$).

Ключові слова: в'язка нестислива рідина, криволінійний канал, система вставок, рівні теплових потоків, число Рейнольдса, число Пекле.

АННОТАЦИЯ

Шалденко А.В. Гидродинамика и теплообмен в каналах со вставками сложной формы в системах теплообвода РЭА. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” МОН Украины, Киев, 2017.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследований, рассматриваются вопросы о научной новизне, теоретическом и практическом значении, апробации полученных результатов, количестве публикаций.

В первом разделе диссертации приведены краткие исторические сведения развития микропроцессоров, рассматриваются особенности конструктивных возможностей теплоотвода на кристаллах элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и определяются проблемы для дальнейших исследований.

Во втором разделе рассматриваются основные уравнения задачи переноса тепла жидким теплоносителем внутри криволинейного канала, заполненного вязкой однородной несжимаемой жидкостью. Задача решается в терминах “функция тока - завихренность” с применением простой явной схемы для решения дифференциальных уравнений с частными производными параболического типа и метода последовательной верхней релаксации для решения уравнений эллиптического типа.

В третьем разделе представлены результаты вычислений и анализа структуры течения и уровня тепловых потоков для прямолинейного канала без вставок и со вставками разной геометрии для симметричного и несимметричного их следования.

В четвертом разделе работы проводится анализ гидродинамических параметров течения внутри криволинейного канала аналогичной длины и процесса теплопередачи с внешней среды в теплоноситель. В работе проводится анализ структуры течения внутри криволинейного канала, его влияние на уровни тепловых потоков из внешней нагретой среды в холодный теплоноситель.

Научная новизна полученных результатов состоит в дальнейшем развитии вычислительных методов расчета физических полей в охлаждающих каналах РЭА. Получены следующие новые результаты, которые выносятся на защиту:

- Впервые решена задача переноса тепла из внешней нагретой среды в холодный теплоноситель с использованием численных методов, адаптированных для каналов с

произвольной геометрией ограничивающих поверхностей на равномерной сетке в приближении малых чисел Рейнольдса Re ;

- установлено условие устойчивости простой явной схемы численного решения нелинейных параболических уравнений переноса завихренности и тепла на равномерной сетке;

- получена количественная зависимость уровней тепловых потоков через границы криволинейных каналов со вставками и разности давлений на входе и выходе каналов от скорости течения теплоносителя при числах Рейнольдса $Re < 650$;

- установлено влияние ширины сегментов зигзагообразных каналов на образование квазистационарных циркуляционных зон в угловых областях течения;

- показано, что система вставок внутри каналов позволяет увеличить уровни тепловых потоков из внешней среды в теплоноситель для течений при малых числах Рейнольдса Re за счет увеличения потерь на давление, необходимого для формирования течения с заданной скоростью;

- выявлено, что введение системы вставок различной геометрии в криволинейные каналы при малых числах Рейнольдса ($Re < 30 \dots 40$) не приводит к увеличению уровня тепловых потоков. В этом диапазоне скоростей потери на давление связаны только с изменением направления течения при обтекании потоком вставок;

- определены геометрические параметры вставок, при которых достигаются наибольшие уровни тепловых потоков через ограничивающие поверхности криволинейных каналов для чисел Рейнольдса $Re < 650$.

В работе численно решена задача переноса тепла из внешней нагретой среды в криволинейный микроканал со вставками различной геометрии, заполненный однородной вязкой несжимаемой жидкостью, в терминах “функция тока - завихренность” в безразмерном виде в приближении малых чисел Рейнольдса Re .

Показано, что простой явный метод решения уравнений переноса завихренности и переноса тепла имеет ограничение на шаг дискретизации по времени, выполнение которого обеспечивает устойчивые вычисления на равномерной пространственной сетке для заданных параметров уравнений (число Рейнольдса, число Пекле).

Получена количественная зависимость уровней тепловых потоков через границы криволинейных каналов со вставками различной геометрии (высота, ширина, расстояние между вставками для симметричного и несимметричного их следования) и разности давлений на входе и выходе прямолинейного и зигзагообразного каналов от скорости ламинарного течения теплоносителя в диапазоне $Re = 10 \dots 650$.

Показано, что система вставок внутри каналов позволяет увеличить уровни тепловых потоков из внешней среды в теплоноситель по сравнению с каналами без вставок в области чисел Рейнольдса $Re = 200 \dots 650$. При этом относительный коэффициент эффективности каналов (по сравнению с прямолинейным каналом без вставок одинаковой длины) может достигать значений $k = 1.10 \dots 1.40$.

Определены геометрические параметры вставок, при которых достигаются наибольшие уровни тепловых потоков через ограничивающие поверхности криволинейных каналов для ламинарных течений теплоносителя в области чисел Рейнольдса $Re = 100 \dots 250$: узкие вставки ($c \approx 0.1D$) умеренной высоты ($h \approx 0.2D$), расположенные на расстоянии порядка ширины канала ($a \approx D$).

Ключевые слова: вязкая несжимаемая жидкость, криволинейный канал, система вставок, уровни тепловых потоков, число Рейнольдса, число Пекле.

SUMMARY

Shaldenko O.V. Hydrodynamics and heat transfer in channels with complicated shape of fittings in heat sink systems in REA. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical science by specialty 01.02.05 – mechanics of fluid, gas and plasma. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MES of Ukraine, Kyiv, 2017.

The problem of heat transfer from the outside heated environment to the curvilinear channel filled with a homogeneous incompressible viscous fluid in terms of “stream function – vorticity” for dimensionless form in the approximation of small Reynolds numbers Re is solved numerically. This solution is reduced to the simultaneous solution of equations for vortex transfer, convective heat transfer, and Poisson equations for stream function and pressure with relevant initial and boundary conditions.

It is shown that simple explicit method for solving nonlinear equations for vorticity transfer and heat transfer is defined by sampling step time, which provides stable calculations on a uniform spatial grid. Testing of two-dimensional hydrodynamic problem of stationary laminar flow of viscous incompressible fluid inside the straight channel without fittings and unsteady one-dimensional problem of heat transfer from the hot wall to the cold wall shows the good agreement of numerical results and analytical solutions presented in the scientific literature.

Quantitative dependence of levels of heat flow across the border for curved channels with fittings of different geometry (height, width, distance between fittings for symmetric and asymmetric adherence of them) and the pressure difference at the inlet and outlet for both straight and zigzagged channels was obtained within the range of Reynolds number $Re = 10 \dots 650$.

It was shown that the fittings system inside channels allows to increase the level of heat flow of coolant to the environment with compared to the channels without fittings for the Reynolds number $Re = 200 \dots 650$. In this case the relative feed efficiency ratio (compared to the straight channel without fittings for equal length of the channel) can reach values of $k = 1.10 \dots 1.40$. Corner areas before and after fittings form stationary (or quasi-stationary) circulating areas and a system of localized vortex structures.

The geometric parameters of fittings, at which the greatest level of heat flow through the curved surface limiting channels for laminar flow of coolant in the Reynolds number $Re = 100 \dots 250$ was defined, namely: narrow insertion ($c \approx 0.1D$) moderate height ($h \approx 0.2D$) located in close proximity to the channel width ($a \approx D$).

Keywords: viscous incompressible fluid, curvilinear channel, fitting system, levels of heat flows, Reynolds number, Peclet number.