

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**БАСКОВА ОЛЕКСАНДРА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 532.526;542

**УПРАВЛІННЯ ВИХРОВИМ ТЕПЛОМАСООБМІНОМ  
В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України, на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики.

**Науковий керівник**

член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор  
**Воропасв Геннадій Олександрович**,  
Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського”, професор кафедри атомних  
електричних станцій і інженерної теплофізики.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Давиденко Борис Вікторович**,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
головний науковий співробітник відділу  
теплофізичних основ енергоощадних  
технологій

кандидат технічних наук  
**Згурський Володимир Олександрович**,  
Інститут газу НАН України,  
старший науковий співробітник відділу  
високотемпературного тепломасообміну

Захист відбудеться «\_\_» лютого 2020 року о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 у Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» січня 2020 року.

**Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради**

**В.І. Коньшин**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Процеси генерації, перетворення, використання та утилізації теплової енергії в промисловості та енергетиці з кожним роком потребують все більш потужного і одночасно компактного теплообмінного обладнання. Збільшення енергоефективності устаткування та зменшення його масогабаритних параметрів є одними із найактуальніших питань енергетики на сьогоднішній день. Застосування часткового структурування поверхонь у вигляді гофрів синусоїдальної форми вирішує проблему компактності та надає можливість змінити структуру течії таким чином, щоб досягти оптимального співвідношення між інтенсивністю тепломасопереносу та супутніми гідравлічними втратами. Основна частина теплообмінного обладнання працює при витратному турбулентному режимі течії. Вимога до ефективності теплообмінного обладнання визначає напрямок досліджень, за яких можна підвищувати теплообмін при збереженні або зменшенні витрат теплоносія. Отже дослідження перехідного режиму неізотермічної течії і теплообміну на початкових ділянках труб набувають особливої актуальності. Така течія характеризується значною зміною гідравлічного опору, а також, при наявності великих градієнтів в'язкості в пристінній зоні, суттєвою зміною вихрової структури примежового шару. Дослідження механізмів теплогідравлічних процесів, що відбуваються за таких умов, а також систематизація та узагальнення існуючих даних і більш глибокий аналіз впливу кожного режимного, теплофізичного, геометричного параметру на теплогідравлічні властивості течії є необхідною умовою розробки енергоефективних поверхонь, як і подальше дослідження теплообміну і гідродинаміки потоку в трубах із повністю розвиненою поверхнею та з частковим гофруванням.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертація виконана на кафедрі АЕС і ІТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського, згідно з держбюджетними науково-дослідними роботами: №2111-ф "Процеси теплообміну і гідродинаміки у мініатюрних двофазних системах", реєстраційний номер №0118U003539, №2207-п "Дослідження теплогідравлічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики", реєстраційний номер №0119U001065. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика і енергоефективність» (Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки: Закон України від 11.06.2001 р. №2623-III.) і тісно пов'язана з дослідженням та розробкою нових вискоелективних теплообмінних поверхонь на основі гофрованих труб.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи - визначення впливу геометрії теплообмінної поверхні, залежності фізичних параметрів середовища від температури, режиму течії і напрямку теплового потоку на гідравлічні і теплові характеристики потоку на початковій ділянці труби в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса. Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- провести розгляд існуючих методів інтенсифікації теплообміну у внутрішніх течіях та виконати аналіз їх ефективності при різних теплогідрравлічних параметрах потоку;
- провести дослідження впливу залежності теплофізичних параметрів потоку від температурного поля на теплові і гідравлічні параметри течії в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса;
- встановити взаємозв'язок гідравлічних і теплових параметрів потоку із геометрією теплообмінної поверхні;
- розробити рекомендації щодо проектування структурованих поверхонь, які інтенсифікують теплообмін при мінімальних гідравлічних втратах в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса.

*Об'єкт дослідження* - теплогідрравлічні процеси у внутрішніх течіях при перехідних числах Рейнольдса.

*Предмет дослідження* – вплив геометричних параметрів структурованої поверхні труб на динамічні і теплові характеристики внутрішніх течій.

**Методи дослідження.** У якості методу дослідження було обрано чисельний експеримент, який проводився із застосуванням програмного комплексу ANSYS Fluent. Досліджувалися теплообмінні та гідродинамічні процеси при перехідних числах Рейнольдса на початкових ділянках як повністю гладких трубах, так і в трубах із різними геометричними параметрами гофрованої вставки.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На початковій ділянці труби із частковим гофруванням поверхні в діапазоні перехідних чисел Рейнольдса вперше:

- досліджено особливості розвитку та генерації збурень потоку в гладких трубах та трубах із частковим гофруванням; вплив збурень на теплообмінні процеси;
- показано взаємозв'язок геометричних параметрів часткового гофрування із теплообмінними та гідродинамічними процесами в трубі;
- виконано дослідження впливу параметрів гофрованої вставки на течію в сліді за нею;
- показано енергоефективність кожного типу гофрування;
- представлені діапазони геометричних параметрів і відповідні діапазони чисел Рейнольдса і Прандтля за яких гофрована вставка заданих параметрів найбільш енергоефективна.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в даній роботі результати можуть використовуватися як при реконструкції вже існуючого теплообмінного обладнання так і при конструюванні сучасних енергоефективних теплообмінних апаратів. Досліджені закономірності течії на початкових ділянках труб із гофрованими вставками можуть бути використані в процесі підготовки студентів теплоенергетичного факультету КПІ імені Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети і задач дослідження, розробка методології і математичної моделі здійснювались спільно з науковим

керівником. Здобувачем виконано огляд літературних джерел, проведено чисельний експеримент по дослідженню теплообміну і гідродинаміки потоків в трубах із гофрованими вставками. Спільно з науковим керівником виконано аналіз отриманих даних. Зроблено порівняння отриманих результатів з експериментальними дослідженнями інших авторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи були представлені на XIV, XV, XVI, XVII Міжнародних науково-практичних конференціях аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Україна, м. Київ, 18-21 квітня 2016 р., 25-28 квітня 2017 р., 24-27 квітня 2018 р., 23-26 квітня 2019 р.), на П'ятій та Шостій міжнародних науково-практичних конференціях «Комп'ютерна гідромеханіка» (Україна, м. Київ, 29-30 вересня 2016 р., 26-27 вересня 2018 р.), на VI Всеросійській конференції з міжнародною участю «Тепломасообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Росія, м. Новосибірськ, 21-23 листопада 2017р.), VIII International conference on vortex flows mechanics (China, X'ian, 15-18 October 2018), XIX International Conference «Dynamical system modelling and stability investigation» (Україна, м. Київ, 22-24 травня 2019), Final AMMODIT Conference «Mathematics for Life Sciences» (Ukraine, Kyiv, March 18 - 22, 2019).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи представлені 15 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 143 сторінки, 63 ілюстрацій, 5 таблиць, список використаних джерел, що включає 88 найменувань, 3 додатка на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

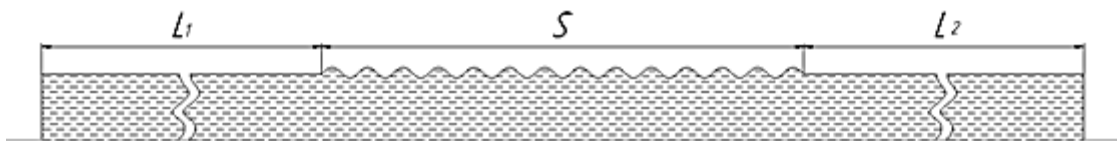
**У вступі** обґрунтовано вибір теми досліджень, сформульовані мета і задачі дослідження, описано метод дослідження, показано зв'язок з науковими програмами, планами і темами, а також наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок автора, приведені відомості про апробацію результатів дисертації, її структуру та обсяг.

**У першому розділі** описані різні методи інтенсифікації теплообміну, зроблено аналіз їх переваг і недоліків. Приведено найбільш поширені критерії енергоефективності та висновки щодо їх точності та доцільності. Показано сучасний стан проблеми дослідження інтенсифікації теплообміну при застосуванні структурованих поверхонь у вигляді гофрів. Наведені дані щодо перших досліджень гофрованих поверхонь. Проаналізовано дані щодо інтенсивності теплообміну та гідравлічного опору в трубах із пасивними методами інтенсифікації тепловіддачі, що викладені в роботах: Халатова А.А., Письменного Є.М., Попова И. А., Pradip R. B., Sreedhara Rao B., Stasiek J.,

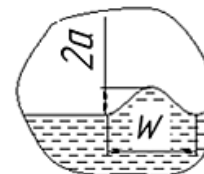
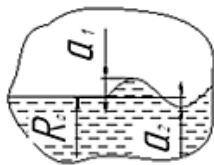
Ciofalo M., Yu S. C. M., Niceno B., Zimparov V. D., Vulchanov N. L., Vicente, P.G., Naphon, P. та ін. В цих роботах розглядаються закономірності розвитку вихрових утворень на структурованих поверхнях, в тому числі і особливості впливу теплофізичних величин на структуру потоку та теплогидравлічні процеси. Розглядається вплив накопичення збурень в потоці і режиму течії на механізми теплообміну і гідравліки в трубах із гофрованими стінками. Однак, при порівнянні отриманих даних на гофрованих поверхнях однакової форми і при однаковому режимі течії виявлено розбіжності між кореляціями фізичних величин (теплових і гідравлічних), запропонованих різними авторами. Також виявлено відсутність даних щодо часткового гофрування поверхні та його впливу на теплогидравлічні процеси в трубі. На основі літературного огляду сформульовано мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження.

**Другий розділ** присвячений фізичній і математичній постановці задачі та особливостям проведення комп'ютерного моделювання гідродинамічних і теплових процесів на початкових ділянках гладких труб та труб з гофрованими вставками різної геометрії в умовах неізотермічності при перехідних числах Рейнольдса.

Тестова ділянка, яка імітує течію на початковій ділянці труби із гофрованою вставкою, що розташовується в місці зародження власних коливань потоку в трубі, представлена на (рис. 1).

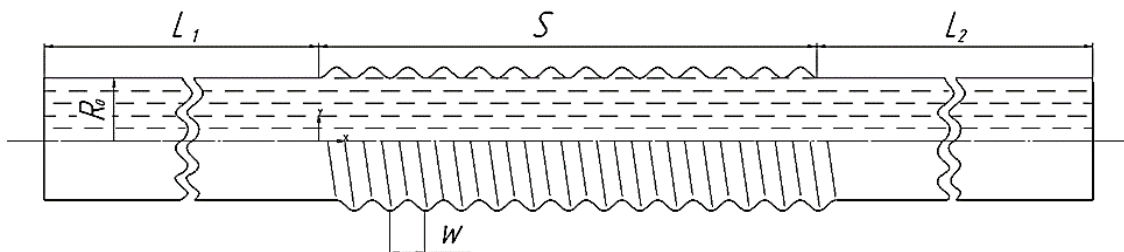


а) початкова ділянка труби із прямою гофрованою вставкою



б) «загромаджуюче» гофрування

в) «незагромаджуюче» гофрування



г) початкова ділянка труби із витою гофрованою вставкою

Рис. 1. Об'єкт дослідження

Довжина вхідного патрубку  $L_1 = 1500$  мм, вихідного  $L_2 \sim 1640$  мм,  $S = 280$  мм... $500$  мм. Розглядалися два види гофрування: пряме гофрування (рис. 1, а) та вите гофрування (рис. 1, г), яке поділялось на гофрування

«загромаджуючого» типу із локальним радіусом  $R_{\text{лок}} < R_0$  на довжині одного поглиблення (рис. 1, б) та гофрування «незагромаджуючого» типу  $R_{\text{лок}} > R_0$  (рис. 1, в).

Геометричні параметри гофрованих вставок у вигляді безрозмірних співвідношень змінювалися в наступних діапазонах:

- співвідношення довжини хвилі до радіуса труби,  $k_1=w/R_0=0,29\dots 1,71$ ;
- співвідношення амплітуди хвилі до її довжини,  $k_2=2a/w=0,075\dots 0,9$ ;
- співвідношення амплітуди хвилі до радіуса труби,  $k_3=2a/R_0=0,06\dots 0,86$ ;
- кут нахилу витого гофрування до вісі труби,  $\beta=70^\circ\dots 90^\circ$ ;
- співвідношення параметра пережиму прохідного перерізу до радіуса труби  $k=a_2/R_0=0\dots 0,086$ .

Течія в'язкої нестисливої теплопровідної рідини в трубі з гофрованою вставкою описується класичною нестационарною системою рівнянь Нав'є-Стокса, нерозривності та енергії у циліндричній системі координат (1-4):

$$\frac{\partial u_r}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\varphi^2}{r} = \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left( \Delta u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial \mu}{r \partial \varphi} \left( \frac{\partial u_r}{r \partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \right),$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + u_\varphi \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} + u_z \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{u_r u_\varphi}{r} =$$

$$= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \mu \left( \Delta u_\varphi - \frac{u_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial r} \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r} + \frac{\partial u_r}{r \partial \varphi} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{r \partial \varphi} \left( \frac{\partial u_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{u_r}{r} \right) + \frac{\partial \mu}{\partial z} \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{r \partial \varphi} \right) \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \varphi} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} =$$

$$= \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \Delta u_z + \frac{\partial \mu}{\partial r} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial \mu}{r \partial \varphi} \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{r \partial \varphi} \right) + 2 \frac{\partial \mu}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \Delta T,$$

де  $\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}$ ,  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості

теплоносія, залежність якого від температури представлена у вигляді:

$$\mu = 2,791 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,885706 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,03231448.$$

Теплоносій - вода із температурою на вході, яка змінювалась в діапазоні, поширеному в теплообмінному обладнанні ( $T_f=283\text{K}\dots333\text{K}$ ), діапазон середньовитратних швидкостей складав  $U_0 = (0,03\dots0,1)$  м/с, що відповідає числам Рейнольдса  $Re=1000\dots5500$ , для яких динамічний коефіцієнт в'язкості води визначається за температурою поверхні труби, визначальний розмір – діаметр труби. Зміна числа Рейнольдса відбувалася шляхом зміни витрати теплоносія. На стінці труби задавалася постійна температура та умова прилипання. Різниця температур між стінкою труби та температурою на вході складала від 0 К до 50 К.

У якості засобу побудови дискретних аналогів вихідних рівнянь використано метод контрольного об'єму ANSYS Fluent в якому система рівнянь (1-4) інтегрується по кожному кінцевому об'єму, а отримані значення величин зберігаються в його центральній точці.

При проведенні комп'ютерного моделювання серед наявних в програмному комплексі ANSYS Fluent методів використовується метод прямого чисельного моделювання (Direct Numerical Simulation, DNS) повної системи рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності без додаткового спрощення та з урахуванням всіх притаманних течії ефектів. Результати моделювання за умови правильної побудови сіткового шаблону та правильного підбору параметрів моделювання за відповідних чисел Рейнольдса дозволяють дослідити виникнення та розвиток збурень потоку певних масштабів, які наближені до результатів натурального експерименту, але перевершують його за кількістю корельованої інформації.

При чисельному моделюванні конвективних членів рівнянь моделі обрана схема із різницями проти потоку другого порядку точності, що дозволяє зменшити числову помилку дискретизації (чисельну дифузію), через введення додаткового члена у вираз для апроксимації просторової похідної.

Через значні градієнти тиску на досліджуваній ділянці у якості схеми інтерполяції рівняння корекції тиску встановлена схема другого порядку (Second Order Scheme), схожа за принципом дії на схему дискретизації другого порядку для конвективних членів. У якості алгоритму зв'язку полів тиску та швидкості був обраний SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations - Consistent) із стандартним набором параметрів релаксації. Даний алгоритм використовує взаємозв'язок між поправками швидкості і тиску для забезпечення збереження маси і отримання поля тиску. Рівняння нерозривності не вирішується явно, а використовується як поправка для корекції поля тиску, котре задовольняє рівнянню нерозривності.

В дослідженні використовувались структуровані сітки параметри яких визначалися максимальним числом Рейнольдса із розглянутого діапазону дослідження та згущенням до поверхні труби. В області прямого гофрування також використовувалися еквідистантні сітки (рис.2, а).

При дослідженні витого гофрування поблизу стінок будувалася структурована сітка, а в ядрі потоку та в зоні гофрування (тривимірний випадок) – неструктурована (рис. 2, б). Мінімальному динамічному кроку біля



стінки відповідало значення параметра  $h^+ = (u^* \cdot \Delta r) / \nu \leq 0,4$ . Крок за часом обирався таким чином, щоб забезпечити найменші витрати машинного часу і при цьому задовольнити умові Куранта:  $Co < 2$ .

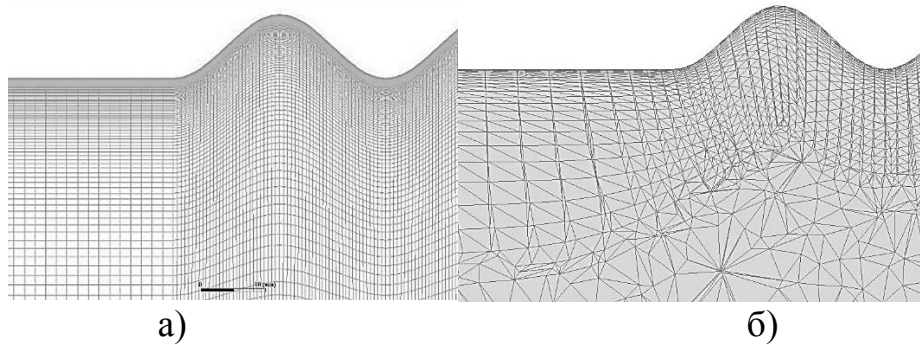


Рис. 2. Структуровані сітки в трубах із а) прямим та б) витим гофруванням

У **третьому розділі** розглянуто структуру вихрової неізотермічної течії та її вплив на теплообмінні процеси на початковій ділянці гладкої труби і труби з гофрованою вставкою із  $R_{\text{лок}} > R_0$  при перехідних числах Рейнольдса.

На початковій ділянці труби гідравлічний опір та інтенсивність теплообміну визначає примежовий шар. Довжина початкової ділянки, на якій формується асимптотичний профіль Гагена-Пуазейля, залежить від числа Рейнольдса, геометрії поверхні труби, фізичних властивостей рідини, особливо в'язкості, та початкових збурень. В ізотермічному потоці збурення не спостерігаються в усьому розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса  $Re \leq 5300$ . У неізотермічному потоці, в якому відбувається збільшення в'язкості в напрямку від поверхні труби, збурення швидкості і тиску в потоці так само залишаються фоновими.

В неізотермічному потоці в розглянутому діапазоні температур при зменшенні в'язкості в напрямку від поверхні труби усталений профіль швидкості істотно відрізняється від параболічного, більш того він має точку

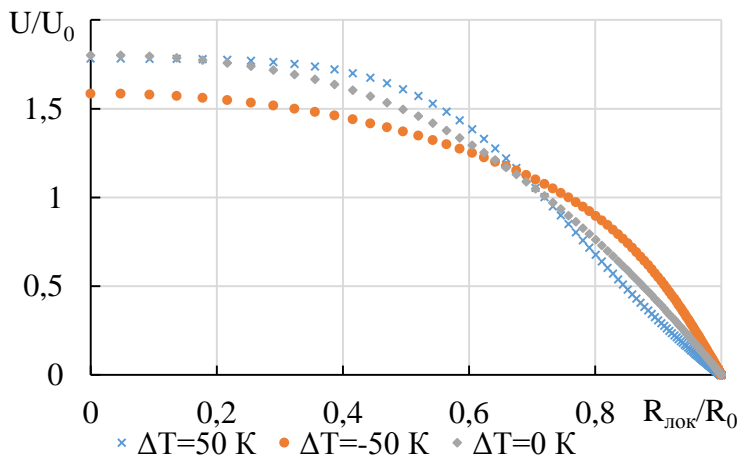


Рис. 3 Безрозмірний профіль швидкості за різних значень  $\Delta T = T_f - T_w$  при числі Рейнольдса  $Re = 1600$

перегину, що, за теоремою Релея, є необхідною умовою нестійкості течії (рис. 3). Тобто перехід до турбулентної течії в трубі в неізотермічних потоках може відрізнитися від переходу при ізотермічній течії, що підтверджують результати розрахунків.

Однак при числах Рейнольдса менших 2000, навіть при наявності точки перегину в профілі швидкості, осциляцій в потоці не спостерігається. Збільшення швидкості до значень,

відповідних числам Рейнольдса  $Re \geq 2300$ , в неізотермічному потоці на певній відстані від входу в трубу призводить до появи низькочастотних осциляцій, що розповсюджуються вниз за потоком (рис. 4) та наростають по довжині труби.

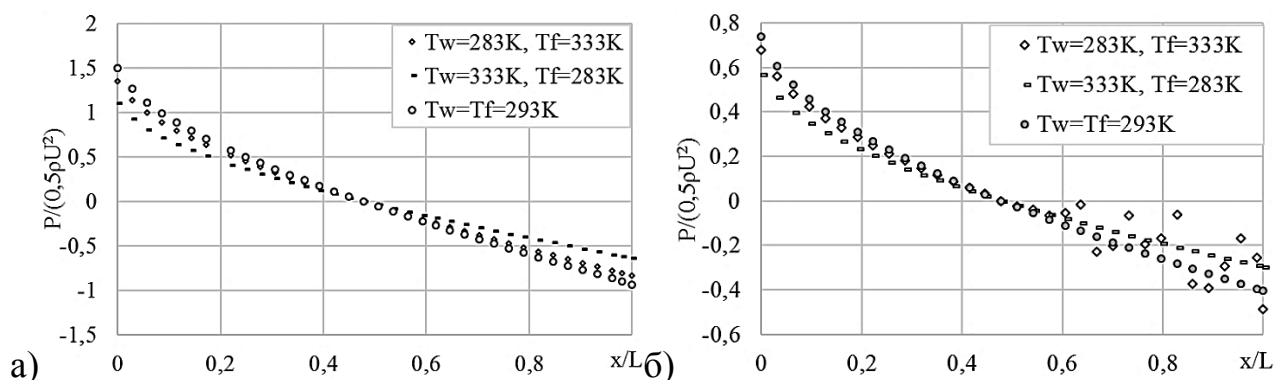


Рис. 4 Безрозмірні значення тиску вздовж вісі труби за різних температурних умов при а)  $Re = 1600$  та б)  $Re = 5300$

При  $Re \sim 2000$  та  $\Delta T = 50^\circ$  амплітуда коливань швидкості та напруження тертя мала (не перевищує 3%...4%) і знаходиться в протифазі із коливаннями теплового потоку, що не перевищують 1% від середнього значення із частотами коливань 0,3 Гц. По досягненні значення числа Рейнольдса 3500 з'являються пікові низькочастотні коливання радіальних швидкостей великої амплітуди, що говорить про початок процесу переходу до турбулентного режиму та викликає відповідні незначно зміщені за фазою коливання локальних значень теплового потоку на поверхні, які сягають 5%. Коливання радіальної швидкості малої амплітуди не мають істотного впливу на теплообмінні процеси. Однак вже при  $Re = 5300$  з'являються пікові коливання радіальної швидкості, що призводить до відповідних коливань теплового потоку з амплітудою, що перевищує середні значення на 20%.

Зміна ступеню збуреності потоку при зміні теплофізичних параметрів течії знаходить своє відображення в інтенсивності теплових процесів. Можна вказати величину температурного напору  $\Delta T = 37,5^\circ$ , починаючи з якої при  $Re = 5300$  на початковій ділянці проявляються довгохвильові збурення кінцевої амплітуди, що призводять до інтенсифікації теплообміну.

Залежно від градієнта температури, а отже і в'язкості, відбувається прискорення або уповільнення початку процесу генерації та розвитку збурень у примежовому шарі. В діапазоні значень температурного напору, відповідного числам Прандтля  $Pr_f > 4,5$  (при  $Pr_w = 9,5$ ,  $\Delta T < 37,5^\circ$ ), в потоці як в гладкій трубі, так і в трубі з гофрованою вставкою при числі Рейнольдса  $Re = 5300$  не спостерігається кінцевих збурень. При числі  $Pr_f \leq 4$  (при  $Pr_w = 9,5$ ,  $\Delta T \geq 37,5^\circ$ ) вплив градієнта в'язкості проявляється у вигляді появи гармонійних низькочастотних коливань в кінці розглянутої ділянки. При подальшому зменшенні числа Прандтля теплоносія, що надходить, початок фіксуємих пульсацій зміщується до входу труби, але фазова швидкість і початкова довжина хвилі збурень практично не змінюються (рис. 5). Збурення, що

виникають всередині примежового шару на поверхні труби, без зсуву фаз і практично з тією ж амплітудою фіксуються на осі труби, що підтверджує трансформацію хвиль завихреності на поверхні труби в хвилю тиску. Довжини хвиль та фазові швидкості виникаючих коливань, які обезрозмірені по товщині примежового шару та по місцевій максимальній швидкості, відповідають класичним значенням хвилі Толлміна-Шліхтінга в примежовому шарі на пластині ( $\lambda/\delta = 6$ ;  $C_\phi/U = 0,45$ ). При  $\Delta T = 50^\circ$  збурення, що поширюються, на початковій ділянці труби втрачають регулярність, різко зростає їх амплітуда і довжина хвилі, що говорить про початок хаотизації процесу переходу; при менших значеннях температурного напору на розглянутій початковій ділянці хвильові збурення зберігають свою регулярність.

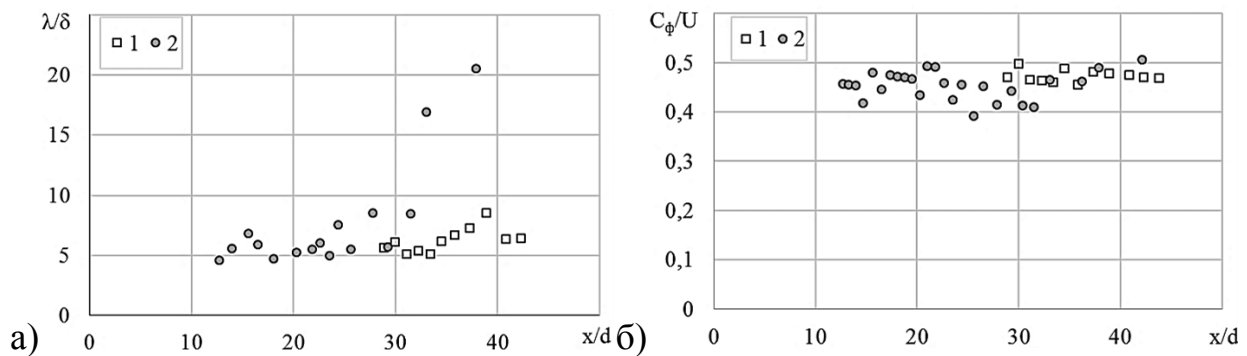


Рис.5. Безрозмірна довжина хвиль збурень ( $Re=5300$ ) (а) та безрозмірна фазова швидкість (б) при різних градієнтах температури в гладкій трубі:  
1 –  $\Delta T=37^\circ$ ; 2 –  $\Delta T=50^\circ$ ;

При фіксованій відстані гофрованої вставки від входу в трубу за різних температурних напорів виникають дві принципово різні ситуації: гофрована вставка сама є джерелом первинних збурень, і гофрована вставка видозмінює власні збурення потоку в трубі, що виникли вище неї за течією. При  $Pr_f = 2,93$  ( $\Delta T = 50^\circ$ ) початок генерації власних збурень в потоці відбувається до гофрованої вставки, а при  $Pr_f = 4,02$  ( $\Delta T = 37,50^\circ$ ) початок виникнення власних збурень в гладкій трубі відповідав би середині гофрованої вставки. При  $Pr_f = 2,93$  гофрована вставка на початковій ділянці труби в залежності від параметрів гофрування змінює вихрові збурення певних масштабів та їх інтенсивність і впливає на формування примежових теплового і динамічного шарів. Після короткохвильового гофрування ( $k_1 < 0,3$ ) спектри пульсацій тиску практично не залежать від амплітуди гофру, але, на відміну від гладкої труби, мають істотно звужений діапазон (рис. 6).

Спектри пульсацій тиску після довгохвильового ( $k_1 > 0,5$ ) гофрування навпроти демонструють істотну залежність від його амплітуди. Збільшення амплітуди призводить до появи ще однієї дискретної складової, що означає генерацію вихорів різного масштабу.

Безрозмірні значення амплітуди і довжини хвилі гофра, які відповідають загальноприйнятим поняттям дрібного ( $k_2 = 0,3$ ) і глибокого ( $k_2 = 0,9$ ) поглиблення відповідно, суттєво змінюють структуру вихрового руху. В

дрібному поглибленні вихор має характерний розмір рівний глибині западини і втягує в рух практично весь її об'єм, в той час як в глибокому утворюється застійна зона рідини (рис.7).

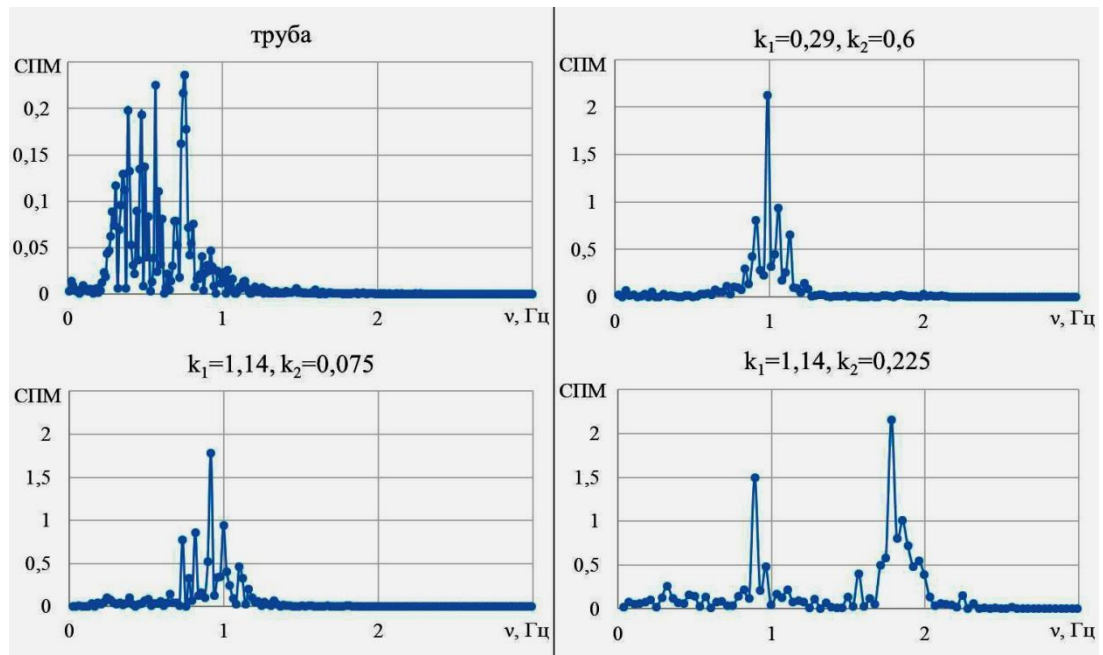


Рис. 6. Частотні спектри пульсацій тиску в трубах з гофрованою вставкою різної геометрії та в гладкій трубі ( $k_2 = 0$ ) при  $Re = 5300$

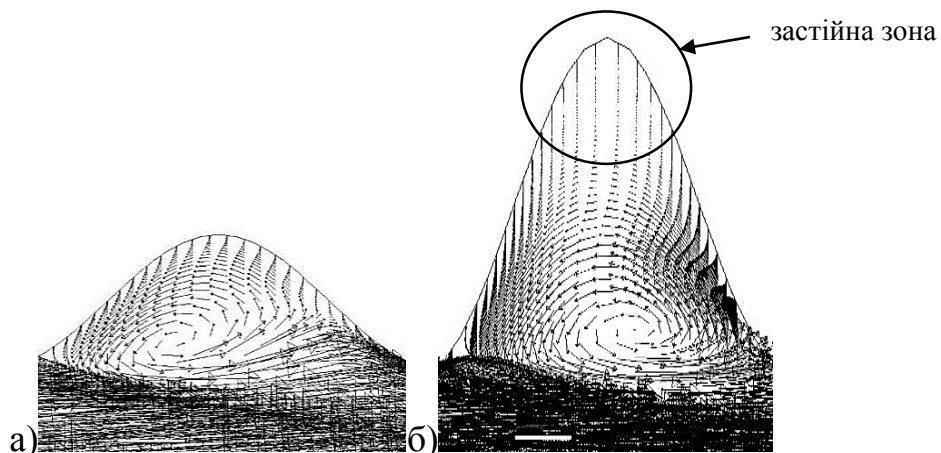


Рис. 7. Векторні поля швидкості в короткохвильових гофрах різної амплітуди при  $Re = 5300, k_1 = 0,29$ : а –  $k_2 = 0,3$ ; б –  $k_2 = 0,9$

На навітряній стінці кожного поглиблення в гофрованій вставці існує точка, в якій потік стикається з поверхнею - «зупиняється» - і товщина примежового шару в районі цієї точки мінімальна. В цій точці, як і в місцях стику гофрів, де товщина примежового шару також мінімальна, напруження тертя і теплообмін значно вищі (рис. 8).

В поглибленні гофру утворюються вихрові структури різних масштабів та інтенсивності, стійкість яких обумовлюється геометрією структурованої поверхні і числом Рейнольдса, а також місцем розташування гофра во вставці. Зі збільшенням температурного напору стійкість вихрової течії всередині

поглиблень порушується з утворенням нестійкої багатовихрової системи, гофрована поверхня стає джерелом збурень. Від гофра до гофра інтенсивність вихрового руху в поглибленні зростає, як і обумовлена ним конвективна складова теплообміну та тертя. На рис. 8 наведені значення напруги тертя на ділянці в середині короткохвильової гофрованої вставки при  $Re = 5300$ .

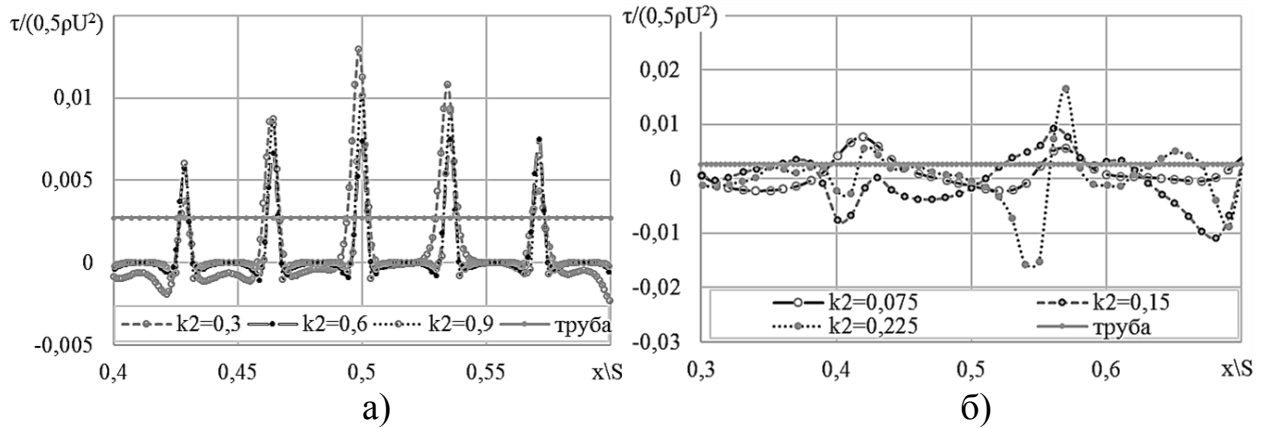


Рис. 8 Напряга тертя при  $Re = 5300$  в гладкій трубі та на поверхні гофрів різної геометрії: а -  $k_1 = 0,29$ , б -  $k_1 = 1,14$ .

Для короткохвильового гофра  $Re_w = Uw/v = 540$  ( $w$  - довжина хвилі гофра) напруга тертя всередині поглиблення гофра при відносній амплітуді гофра  $k_2 = 0,3$ , коли вихор стійкий, приймає негативні значення і стає нульовою при збільшенні амплітуди гофра. Вихрові структури, генеровані заглибленнями короткохвильового гофра, мають менші масштаби в порівнянні з власними збуреннями потоку і слабо впливають на послідовний розвиток вихрової течії в трубі. Проте проходження власного збурення потоку суттєво впливає на значення фізичних параметрів, наприклад, напруження тертя істотно зростає в місцях його проходження (рис. 8, а).

Результати чисельного експерименту на короткохвильовому гофрі показують, що руйнування власних збурень течії не відбувається, але при цьому швидкість наростання цих збурень зменшується. При довгохвильовому гофруванні спостерігається прямий вплив вихрової системи гофрів на власні довгохвильові збурення течії за відповідних чисел Рейнольдса.

При збільшенні довжини хвилі гофрованої поверхні визначальним фактором структури вихрової течії всередині поглиблення стає її стійкість. На рис. 8, б наведені значення напруги тертя на середній ділянці довгохвильового гофра ( $k_1 = 1,14$ ) для різних амплітуд гофрування. При малих відносних амплітудах хвилі  $k_2 \sim 0,1$  вихори малих масштабів, що формуються в поглибленнях і періодично залишають їх, не мають істотного впливу на динамічні параметри зовнішньої течії. При збільшенні відносної амплітуди до  $k_2 = 0,15$  між гребнями формується досить інтенсивна багато вихрова система, що періодично руйнує збурену течію в трубі. Відповідно збільшуються значення напруження тертя, як в самому поглибленні, так і в місцях стику.

Подальше збільшення амплітуди призводить до ще більш нестійкої та інтенсивної течії в поглибленнях, але періодичність її руйнування зберігається.

Відповідні зміни структури потоку в залежності від довжини хвилі та амплітуди гофра обумовлюють інтенсивність теплообміну. Так при досягненні перехідних значень числа Рейнольдса  $Re_w = 2500$  єдине вихрове утворення в поглибленні трансформується в багатовихрову структуру. Масообмін між рідиною в поглибленнях гофрів та основним потоком теплоносія з'являється при  $k_1 > 0,6$  і по мірі подальшого збільшення довжини хвилі гофра зростає, що підтверджується значеннями радіальної складової швидкості на межі розділу. Зміна структури вихрової течії із збільшенням довжини поглиблення призводить до інтенсифікації тепломасообміну в самому поглибленні. При збільшенні довжини хвилі гофра інтенсивність тепловіддачі зростає, але при досягненні довжини хвилі  $k_1 = 0,7$  тепловіддача майже не змінюється (рис. 9).

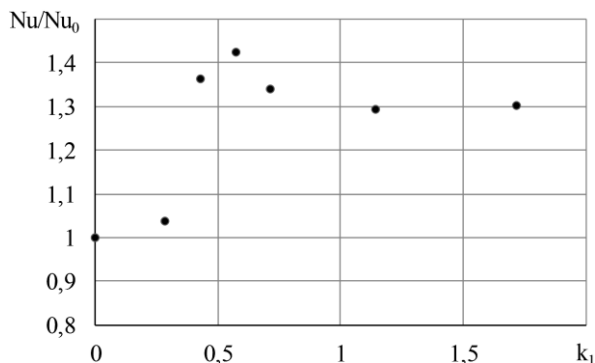


Рис. 9. Залежність інтенсивності теплообміну в зоні гофрованої вставки від довжини хвилі гофра при  $Re = 5300$

Вплив амплітуди гофрування на теплообмін суттєво залежить від довжини хвилі гофрування. Так при амплітуді  $k_2 > 0,6$  короткохвильового гофра ( $k_1=0,29$ ) конвективна складова теплообміну зменшується під впливом утвореної зони застою, котра має температуру стінки і яку можна розглядати як додатковий термічний опір. Поява застійної зони частково компенсується збільшенням площі теплообміну гофрованої поверхні, однак більша стабілізація потоку при  $k_2 > 0,6$  призводить до зниження

тепловіддачі як на гофрованій ділянці, так і в сліді на вихідному патрубку.

Найбільше значення щільності теплового потоку по довжині хвилі гофра, як і слід було очікувати, приходиться на гребні гофрів, де товщина прилежого шару мінімальна. Інтенсивність вихрової течії і, відповідно, інтенсивність теплообміну в поглибленні залежить від розташування поглиблення по довжині гофрованої вставки (рис. 10, а, б) і в перших поглибленнях менша за теплообмін в гладких трубах через малу конвективну складову.

У кожному наступному поглибленні зростає завихреність і інтенсивність конвективного теплообміну. Однак, в короткохвильовому гофруванні (рис. 10,а) це відбувається дуже повільно і вихід на постійні значення чисел Нуссельта, осереднених по довжині поглиблення, при довжині гофрованої вставки  $S/d = 4$  не відбувається, незалежно від числа Рейнольдса.

Довгохвильова гофрована вставка ( $k_1 = 1,14$ ), що відповідає числу Рейнольдса по довжині хвилі гофра  $Re_w = 3000$  в розглянутому діапазоні амплітуд гофра демонструє збільшення теплообміну в зоні вставки із збільшенням амплітуд, через досягнення максимальних середніх по довжині

поглиблення значень теплогідравлічних параметрів, починаючи вже з четвертого гофра у вставці (рис. 10, б). Через більш інтенсивну вихрову течію в поглибленнях гофра тепловіддача перевищує тепловіддачу в гладкій трубі не тільки на гребнях гофрів, але і в самих поглибленнях.

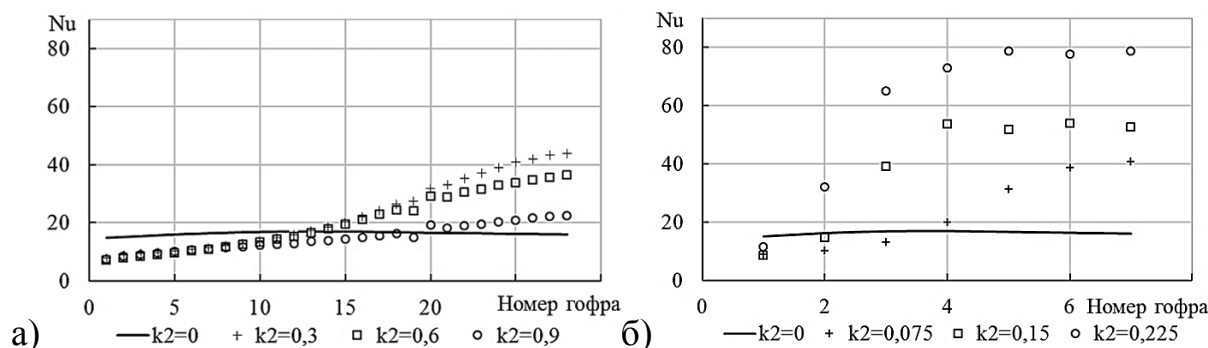


Рис 10. Числа Нуссельта, осереднені по довжині поглиблення а - короткохвильового та б - довгохвильового гофрування різної амплітуди

Оцінка впливу введення гофрованої вставки на інтенсивність теплообміну в трубі проводилась для зон гофрування та вихідного патрубку, в якому структура потоку знаходиться під прямим впливом вставки (табл. 1).

Таблиця 1 - Теплогідравлічні параметри труб з гофрованою вставкою по відношенню до гладкої труби

$Re_w$	$k_3=2a/R$	$\Delta P/\Delta P_{\text{гл}}$	$Nu/Nu_{\text{гл}}$
770	0,06	0,97	0,95
770	0,09	0,99	1,02
770	0,17	1,00	1,04
770	0,26	1,02	0,92
3080	0,09	1,00	1,07
3080	0,17	1,02	1,29
3080	0,26	1,04	1,45
3080	0,4	1,04	1,59
3080	0,57	1,07	1,74
3080	0,86	1,09	1,62
4600	0,17	1,01	1,30

Для короткохвильових гофрів існує значення  $k_3 = 0,17$  (екстремум), по досягненні якого подальше збільшення амплітуди призводить до зменшення тепловіддачі на ділянці гофрованої вставки та вихідного патрубку (табл. 1)



через слабку взаємодію стаціонарної вихрової системи в поглибленнях із основним потоком.

Максимальна інтенсифікація теплообміну після введення короткохвильових гофрованих вставок розглянутих параметрів не перевищує (4-5)%, гідравлічний опір збільшується на (2-2,5)%. При введенні довгохвильової гофрованої вставки в усьому розглянутому діапазоні геометричних параметрів із зростанням амплітуди гофрування відбувалося підвищення тепловіддачі на ділянках гофрованої вставки та вихідного патрубку досягає максимуму (до 1,75 разів) при  $k_3 = 0,57$ , та при подальшому збільшенні амплітуди зменшується. Як і в короткохвильовому, в довгохвильовому гофруванні збільшення амплітуди призводило до збільшення гідравлічного опору всієї труби, яке не перевищувало 9%.

У четвертому (а) розділі представлені результати комп'ютерного моделювання течії та теплообміну в трубах із гофрованою вставкою «загромаджуючого» типу ( $R_{\text{лок}} < R_0$ ).

Гофровані вставки «загромаджуючого» типу в діапазоні чисел  $Re < 2000$  в розглянутому діапазоні загромадження  $k = 0 \div 0,086$  не приводять до появи збурень в потоці, течія зберігає шаруватий, усталений характер. Зміна значень гідравлічного опору в трубі після введення гофрованої вставки із збільшенням загромадження не перевищує 5% (рис. 11, а). Оскільки течія незбурена, всередині поглиблень формуються застійні ізотермічні зони з нехтовно малою завихреністю потоку, що призводить до погіршення теплообміну в зоні гофрованої вставки та вихідного патрубка  $Nu/Nu_0 = 0,92 \dots 0,95$  (рис. 11, б).

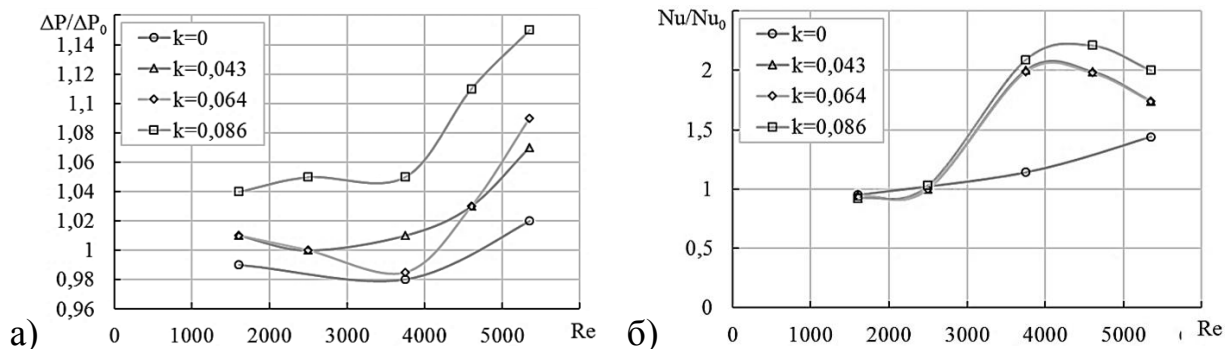


Рис. 11. Гідравлічний опір (а) та інтенсивності тепловіддачі (б) в трубі з гофрованою вставкою у порівнянні з гладкою трубою

Поява збурень, істотно впливаючих на структуру течії і теплообмінні процеси, відбувається при збільшенні числа Рейнольдса до значень  $Re > 3500$ . Збільшення параметру  $k$ , за даних чисел Рейнольдса, через збільшення пережиму прохідного перетину труби викликає локальне збільшення числа Рейнольдса і призводить до збільшення швидкості наростання збурень та їх масштабів, збільшення локальних градієнтів тиску в гофрованій вставці (рис. 11, а).

При числах Рейнольдса більших за 3500 в поглибленнях формується багатовихрова структура, що забезпечує достатнє промивання гофра,



перешкоджає формуванню ізотермічної зони застою і сприяє збільшенню теплообміну в зоні гофрування та вихідного патрубка до 2,1 разів (рис. 12). Це пояснюється істотним зростанням його конвективної складової завдяки більшим за масштабом та інтенсивністю вихровим структурам в пристінній області як в зоні гофрованої вставки, так і в сліді за нею, а також більш ранньому розвитку збурень.

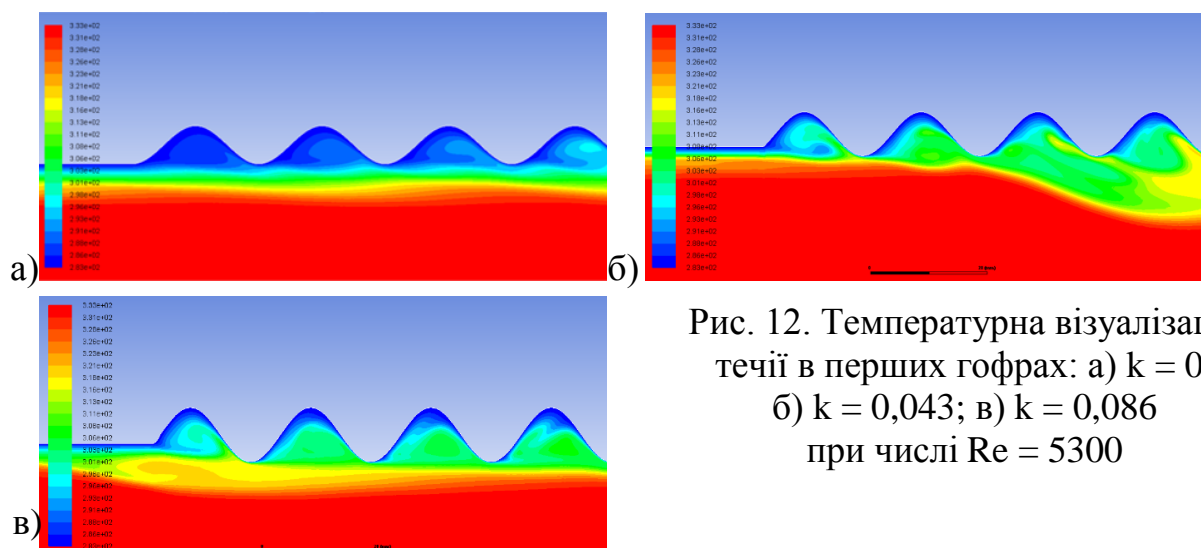


Рис. 12. Температурна візуалізація течії в перших гофрах: а)  $k = 0$ ; б)  $k = 0,043$ ; в)  $k = 0,086$  при числі  $Re = 5300$

При  $Re \sim 4000$  періодичний вихід вихрових утворень з поглиблення сприяє більш інтенсивному масообміну, а отже і теплообміну між ядром потоку і поглибленнями гофрованої вставки.

При  $Re = 5300$  всі поглиблення гофра є «ефективними» з точки зору теплообміну (локальне число Нуссельта по довжині поглиблення перевищує число Нуссельта в гладкій трубі на тій же відстані від входу в трубу), що пояснюється збільшенням значень числа Нуссельта вже на гребнях перших гофрів «загромаджуючого» типу через локальне прискорення потоку.

При «незагромаджуючому» типі гофрування зміна інтенсивності тепловіддачі від гофра до гофра відбувається більш повільно, так як відсутнє прискорення потоку, притаманне «загромаджуючому» гофруванню. Тільки після четвертого від початку вставки гофра вони починають бути «ефективними» (рис. 13).

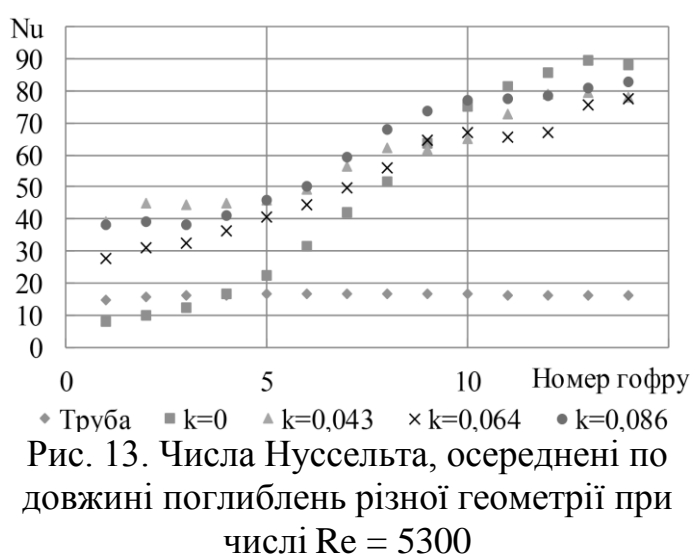


Рис. 13. Числа Нуссельта, осереднені по довжині поглиблень різної геометрії при числі  $Re = 5300$

Це обумовлено різною швидкістю формування вихрової течії по довжині гофрованої вставки та виходу на максимальні постійні значення інтенсивності

теплообміну. При «загромаджуючому» гофруванні через більшу різницю максимальних і мінімальних площ перерізу вихід на постійні значення тепловіддачі відбувається значно раніше. Через це перші вісім гофрів «незагромаджуючого» типу істотно (до 4 разів) поступаються за рівнем інтенсивності вихрових утворень та теплообміну «загромаджуючому» типу. Останні чотири гофра «незагромаджуючого» типа, після виходу на максимальні постійні значення інтенсивності теплообміну, мають практично такі ж числа Нуссельта, осереднені по довжині поглиблення, як у «загромаджуючому» типі.

Більш ранній вихід на постійні значення числа Нуссельта (після 10 гофра) при «загромаджуючому» типі гофрування дозволяє скоротити довжину гофрованої вставки на 30%.

При збільшенні числа Рейнольдса різниця між конвективною складовою теплообміну при «загромаджуючому» гофруванні і в гладкій трубі декілька зменшується завдяки істотному зростанню власних збурень гладкої труби. Так при  $Re = 5300$  інтенсифікація теплообміну становить всього лише 1,75 разів, при цьому гідравлічний опір продовжує зростати до 15% у порівнянні із гладкою трубою. Таким чином, можна говорити про існування для кожного співвідношення амплітуди і довжини хвилі гофра, а також параметра  $a_2$  гофрованої поверхні свого найбільш енергоефективного діапазону чисел Рейнольдса.

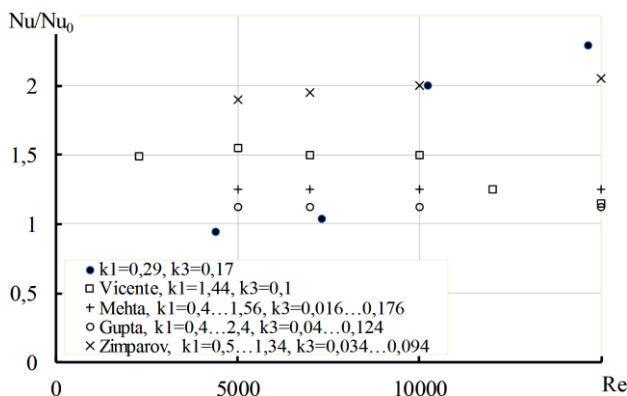


Рис. 14. Інтенсифікація тепловіддачі в трубі з гофрованою вставкою в порівнянні з гладкою трубою в залежності від числа Рейнольдса, розрахованого за температурою потоку

Порівняння із експериментальними даними, отриманими для труб, подібних за геометричними параметрами структурування, показало корельованість за значеннями інтенсифікації тепловіддачі (рис.14). При цьому для труб з гофруванням всій поверхні збільшення опору складає до 1,5 разів у порівнянні із гладкими трубами. У досліджених в даній роботі труб збільшення гідравлічного опору не перевищувало 15%, що говорить про більшу енергоефективність.

У четвертому (б) розділі представлені результати моделювання формування вихрової структури течії та її впливу на конвективний теплообмін на початковій ділянці труби із витом гофрованою вставкою при числі Рейнольдса 5300. Дослідження гідродинамічних і теплових процесів в таких трубах через несиметричність геометрії досліджуваної області потребують тривимірного моделювання.

При моделюванні на підставі тривимірної постановки в потоці при відповідному числі Рейнольдса також з'являються практично вісесиметричні

гармонійні збурення вже на відстані  $x/d \sim 8$  від входу, довжини хвиль яких майже не змінюються і складають  $\lambda = (0,55 \dots 0,65)d$ , безрозмірна фазова швидкість відносно місцевої максимальної швидкості  $U$  змінюється в діапазоні  $C_\phi/U = 0,5 \dots 0,56$ , що відрізняється від аналогічних параметрів двовимірної постановки не більше ніж на 20%. Але хаотизація цих збурень в пристінній зоні зафіксована істотно раніше  $(14 \dots 21)x/d$ , ніж при двовимірній постановці задачі, що фіксується розподілом напружень тертя на поверхні труби (рис. 15). На цій ділянці миттєві значення параметрів течії стають нерівномірними по периметру труби, що підтверджує температурний розподіл у відповідному перерізу труби (рис. 16).

В області витого гофрування  $21 \leq x/d \leq 25$  частина потоку, потрапляючи в поглиблення гофра, відхиляється від руху вздовж осі труби. Як вихрове утворення, одночасно з рухом по лінії твірної гофра, вона залучається до обертального руху всередині поглиблення і залишає його на більшій, ніж при прямому гофруванні, відстані від місця попадання в поглиблення. В кожному наступному гофрі ця відстань збільшується, при цьому знижується інтенсивність теплообміну через менш інтенсивний масообмін з ядром потоку.

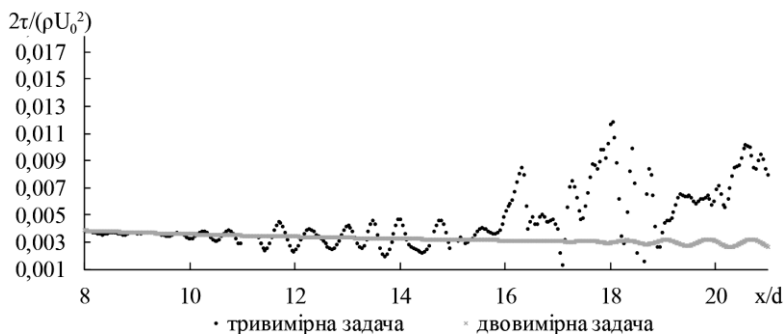


Рис. 15. Миттєві значення напруження тертя  $\tau_x$  на входному патрубку гладкої труби при числі  $Re = 5300$

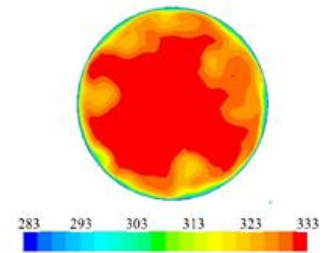


Рис. 16. Миттєве температурне поле в гладкій трубі при  $x/d = 20$

Всередині перших заглиблень формуються моновихрові структури, інтенсивність яких зростає при русі вниз за потоком, що впливає на локальні теплові і гідравлічні параметри. Але, на відміну від прямого гофрування, де додатково впливає змінність повздовжнього градієнту тиску через змінність площі поперечного перерізу, у витого цей вплив мінімальний, тому що площа поперечного перерізу залишається незмінною.

Особливість побудови витих гофрованих вставок, яка полягає у поступовому збільшенні амплітуди перших гофрів, впливає на процеси формування вихрової течії, що приводить до меншої локальної інтенсивності тепловіддачі у порівнянні із прямим гофруванням (рис. 17). По мірі розвитку вихрових структур збільшуються значення тертя та теплових потоків на гребнях гофрів як витих, так і прямих вставок.

Введення гофрованих вставок розглянутої геометрії при числі  $Re = 5300$  та величині температурного напору  $\Delta T = 50^\circ$  інтенсифікує теплообмін в порівнянні з гладкою трубою на відповідній ділянці до 3 разів ( $\beta=80^\circ$ ) при збільшенні площі теплообмінної поверхні до 23%.

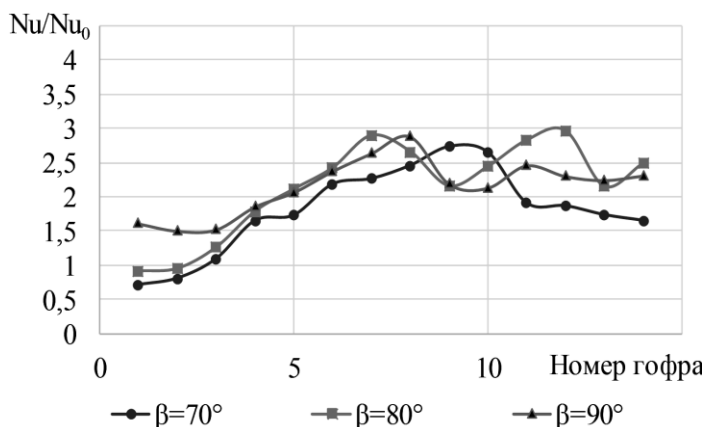


Рис. 17. Відношення тепловіддачі у гофрованих вставках різної конфігурації до тепловіддачі на відповідній ділянці гладкої труби при числі  $Re = 5300$

Незважаючи на різні механізми формування вихрової течії всередині гофрів прямого та витого гофрування в діапазоні  $\beta=80^\circ \dots 90^\circ$ , рівень тепловіддачі практично однаковий, але пряме гофрування викликає більші гідравлічні втрати. При введенні витого гофрованої вставки супутні гідравлічні втрати на відповідній ділянці труби зросли на 58%, при введенні прямого гофрування – на 72%, що обумовлено процесами, виникаючими при зміні площі прохідного перерізу.

Зменшення кута нахилу витого гофрування до осі труби до  $70^\circ$  при збереженні площі гофрованої поверхні збільшує теплообмін лише до 1,8 разів при зростанні гідравлічного опору до 32% у порівнянні з гладкою трубою.

Оцінка енергоефективності введення витого гофрованої вставки показала збільшення інтенсивності теплообміну в зоні гофрування та вихідного патрубку до 20% при збільшенні гідравлічного опору на 7%. Різниця в значеннях інтенсифікації теплообміну обумовлюється поступовим наростанням власних збурень потоку у вихідному патрубку в гладкій трубі, амплітуда яких перевищує амплітуду регуляризованих збурень після гофрованої вставки.

Найбільш енергоефективним в розглянутому діапазоні геометричних параметрів витого гофрування виявилось гофрування із  $\beta=80^\circ$  при заданому числі Рейнольдса  $Re = 5300$ .

**У п'ятому розділі** проаналізовано вплив геометричних параметрів гофрованої вставки на інтенсивність теплообміну в сліді за нею. Моделювання проводилось при числі Рейнольдса  $Re = 5300$  та температурному напорі  $\Delta T = 50^\circ$  ( $Pr_f = 2,93$ ), коли початок переходу знаходиться перед гофрованою вставкою і відбувається взаємодія власних збурень примежового шару з вихровими збуреннями, що генеруються гофрованою поверхнею. Це обумовлює формування вихрової структури течії в сліді за вставкою, яка впливає на інтенсивність теплообміну у відповідній ділянці труби.

В короткохвильових гофрованих вставках ( $k_1 < 0,3$ ) регуляризовані вихрові утворення в сліді за вставкою швидко зменшуються за розмірами та стають меншими, ніж вихрові утворення в гладкій трубі. Зона підвищеного теплообміну не перевищує  $l_{ef}=0,65S$ , де  $S=4d$  - довжина гофрованої вставки. Збільшення інтенсивності тепловіддачі в зоні гофрованої вставки та ділянки

підвищеного теплообміну в сліді за нею становить 1,3 рази. При досягненні довжини гофрованої вставки  $S=5,7d$  зона підвищеного теплообміну в сліді за нею зростає до  $0,8S$ , так як даної довжини короткохвильової «незагромаджуючої» вставки достатньо для виходу на максимальні, осереднені по довжині хвилі гофра значення теплових і динамічних параметрів останніх гофрів. Інтенсифікація теплообміну досягає 2,3 разів. Подальше збільшення довжини гофрованої вставки до  $S/d > 6$  не змінює довжину ділянки підвищеного теплообміну та його інтенсивності.

При довжинах хвиль гофра  $k_1 > 0,3$  завдяки генерації багатовихрових нестійких утворень в поглибленнях, швидкому накопиченню збурень і, відповідно, швидкому виходу на усталені значення динамічних параметрів, осереднених по довжині поглиблень, збільшується зона підвищеного теплообміну до довжини однієї гофрованої вставки (рис. 18, а). Інтенсифікація теплообміну в зоні гофрування та зоні підвищеного теплообміну в сліді за ним підвищується до 3 разів. Після досягнення значення  $k_1 \sim 0,6$  збільшення довжини хвилі гофру не впливає на довжину зони підвищеного теплообміну.

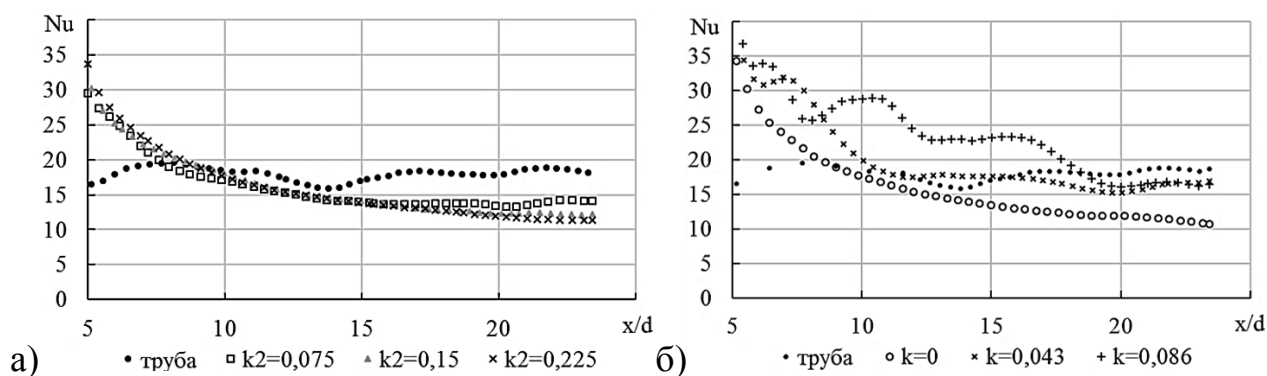


Рис. 18. Інтенсифікація теплообмінних процесів при числі  $Re = 5300$  в сліді за гофрованими вставками різної конфігурації: а – «незагромаджуюче» гофрування, довгохвильове; б – «загромаджуюче» гофрування

Нав'язана вставками вихрогенерація після гофрів створює структуру вихрових збурень, що відрізняється від розвитку природних вихрових збурень в трубах своєю регулярністю. Це обумовлює зменшення інтенсивності тепловіддачі на певній відстані після зони підвищеного теплообміну.

В трубах із витими «незагромаджуючими» гофрованими вставками довжина зони підвищеного теплообміну також не перевищує  $1S$ . Із зменшенням кута  $\beta$  інтенсивність теплообміну зменшується.

Вплив зміни довжини хвилі гофра та амплітуди короткохвильового та довгохвильового гофрування на тепловіддачу та гідравлічний опір в сліді за вставкою обумовлений відповідними особливостями вихрової структури течії, описаними в розділі 3. При цьому гідравлічні втрати змінюються від  $-0,86\Delta P/\Delta P_0$  до  $1,09\Delta P/\Delta P_0$ .

Отже зона підвищеного теплообміну в сліді гофрованих вставок «незагромаджуючого» типу розглянутих геометричних параметрів не перевищує довжини  $1,15S$ .

«Загромаджуючий» тип гофрування має особливості в структурі течії, у порівнянні із «незагромаджуючим» типом, обумовлені його геометрією. Із збільшенням «пережиму» перерізу труби довжина ділянки підвищеного теплообміну зростає до значення  $3S$  (рис. 18, б). Інтенсифікація теплообміну на вставці та в сліді за нею така ж, як і при «незагромаджуючому» типі, що обумовлено великою довжиною  $l_{ef}$ , співпадаючою із різким зростанням збуреності в гладкій трубі. Гідравлічний опір в «загромаджуючих» гофрованих вставках перевищує гідравлічний опір на відповідних ділянках гладкої труби на 40%, що зумовлено зміною поперечного перерізу.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджувався зв'язок нестационарної вихрової структури потоку на початковій ділянці частково гофрованих труб з їх інтегральними характеристиками, вираженими в гідравлічному опорі та інтенсивності теплообміну, які обумовлюють енергоефективність цих труб при перехідних числах Рейнольдса. До основних результатів проведених досліджень можна віднести наступне:

1. Виявлені особливості структури вихрової течії, які проявляються при урахуванні залежності коефіцієнта динамічної в'язкості від температури у вигляді більш інтенсивного вихроутворення та теплообміну при від'ємному градієнті в'язкості по відношенню до поверхні труби. Таким чином, за неізотермічних умов подібності у гідродинамічних і теплових процесах між нестисливою і стисливою рідиною не має.

2. Показано, що застосування гофрованих вставок будь-якої геометрії неефективно при числах Рейнольдса  $Re < 2000$ .

3. Комплексний аналіз результатів дослідження гофрованих вставок «незагромаджуючого» типу розглянутого діапазону геометричних параметрів при перехідних числах Рейнольдса показав, що можна виділити ділянку  $(S + l_{ef})$ , де відбувається суттєве збільшення теплообміну при незначному збільшенні гідравлічного опору. Так при  $Re = 5300$  теплообмін зростає у 3 рази при збільшенні гідравлічного опору до 10%. При збільшенні довжини контрольної ділянки до  $S + L_2$  ( $L_2 = 4l_{ef} \div 7l_{ef}$ ) теплообмін збільшується тільки на 75%, а гідравлічний опір практично не змінюється, що обумовлюється поступовим наростанням власних збурень потоку у вихідному патрубку в гладкій трубі.

4. Результати дослідження енергоефективності гофрованих вставок «загромаджуючого» типу розглянутого діапазону геометричних параметрів при числі Рейнольдса  $2000 < Re < 5500$  показали приблизно однакове значення максимальної інтенсифікації теплообміну, але при більшій довжині  $l_{ef}$  ( $L_2 = 1,3l_{ef} \div 3l_{ef}$ ) та більших значеннях гідравлічного опору. Так при  $Re = 3500$

збільшення інтенсивності теплообміну досягало 2,9 разів при збільшенні гідравлічного опору до 40%. На ділянці  $S + L_2$  інтенсивність теплообміну збільшувалася до 2,1 разів при збільшенні гідравлічного опору до 12%.

5. Показаний взаємозв'язок довжини хвилі гофра з його амплітудою, за яких досягається найбільша енергоефективність гофрованих вставок при відповідному числі Рейнольдса. Визначено порогове значення безрозмірних довжин хвиль гофра, після яких подальше збільшення довжини хвилі не призводить до суттєвого збільшення інтенсивності тепловіддачі в діапазоні розглянутих геометричних параметрів гофрування «незагромаджуючого» типу.

Отримані результати можуть використовуватися як при реконструкції вже існуючого теплообмінного обладнання так і при конструюванні сучасних енергоефективних теплообмінних апаратів. Матеріали даної дисертаційної роботи можуть використовуватись в процесі підготовки студентів теплоенергетичного факультету КПІ імені Ігоря Сікорського.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Baskova O., Voropaiev G. Investigation of flow structure and heat exchange formation in corrugated pipes at transient Reynolds numbers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/8 (87). P. 40 – 45. (**Scopus, Index Copernicus, RINC**).

*У публікації автору належить проведення чисельного експерименту та обробка отриманих даних, попередній аналіз отриманих результатів.*

2. Баскова А.А., Воропаев Г.А. Влияние геометрии гофрированной поверхности на структуру течения и интенсивность теплообмена в трубе. *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2018. Т. 52, № 2. С. 85 – 95. (**RINC, Open Academic Journal Index, Google Scholar**).

*Автор провів ряд чисельних експериментів та виконав порівняльну оцінку інтенсифікації теплообміну та зростання гідравлічного опору при використанні гофрованих вставок різної геометрії.*

3. Баскова А.А. Интенсификация теплообмена в трубах с гофрированными вставками “загромождающего” типа. *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2018. Т. 53, № 3. С. 70 – 78. (**RINC, Open Academic Journal Index, Google Scholar**).

*Автор підготував та провів ряд чисельних експериментів, виконав порівняльну оцінку енергоефективності гофрованих вставок різної геометрії.*

4. Baskova O., Voropaiev G. Influence of the flow structure formation on heat transfer processes in tubes with spiral corrugation inserts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/8 (99). P. 29 – 35. (**Scopus, Index Copernicus, RINC**).

*У публікації автору належить проведення чисельного експерименту та обробка отриманих даних, попередній аналіз отриманих результатів.*

5. Воропаев Г.А., Баскова А.А. Моделирование процесса перехода в трубах со спиральным гофрированием. *Вісник Національного технічного*

університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2019. № 8. С. 75 – 81. (ICI Journals Master List 2017, Ulrich's Periodicals Directory).

*Автор підготував та провів чисельні експерименти, проаналізував особливості течії в трубах із частковим спіральним гофруванням..*

6. Баскова О.О., Воропаєв Г.О. Управління вихровим тепломасообміном в елементах енергетичного обладнання. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, присвяченої 85 річчю теплоенергетичного факультету. Том 1. (Україна, м. Київ, 18–21 квітня 2016 р).* Київ, 2016. С. 75.

*У публікації автору належить проведення досліджень особливостей течії в трубі із гофрованою вставкою, обробка та узагальнення результатів.*

7. Баскова О.О., Воропаєв Г.О. Теплогидравлічні характеристики трубопроводу з гофрованою поверхнею обладнання. *Комп'ютерна гідромеханіка: П'ята міжнародна науково-практична конференція. (Україна, м. Київ, 29-30 вересня 2016 р.).* Київ, 2016. С. 8 – 9.

*У публікації автору належить проведення досліджень та обробка результатів.*

8. Баранюк А.В., Баскова А.А., Воропаєв Г.А., Письменный Е.Н. Рева С.А. Гидродинамика и теплообмен в винтообразных трубах. *Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: VI Всероссийская конференция с международным участием. (Россия, г. Новосибирск, 21–23 ноября 2017 р.).* Новосибирськ, 2017. С. 13.

*У публікації автору належить проведення досліджень течії в трубі із гофрованою вставкою «незагромаджуючого» типу, обробка результатів.*

9. Баскова О.О., Воропаєв Г.О. Управління вихровим тепломасообміном в елементах енергетичного обладнання. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. Том 1. (Україна, м. Київ, 18–21 квітня 2017 р.).* Київ, 2017. С. 67.

*У публікації автору належить проведення досліджень особливостей течії в трубі із гофрованими вставками, обробка та співставлення результатів.*

10. Баскова О.О., Воропаєв Г.О. Вплив геометрії поглиблення гофрованої поверхні на структуру течії та інтенсивність теплообміну в трубі. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. Том 1. (Україна, м. Київ, 24–27 квітня 2018 р.).* Київ, 2018. С. 87.

*У публікації автору належить проведення та обробка даних досліджень структури потоку та інтенсивності теплообміну в трубі із гофрованими вставками «незагромаджуючого» та «загромаджуючого» типів.*

11. Баскова О.О. Теплогидравлические характеристики труб с гофрированными вставками «загромождающего» и «незагромождающего»



типа. *Комп'ютерна гідромеханіка: Шоста міжнародна науково-практична конференція.* (Україна, м. Київ, 26-27 вересня 2018 р.). Київ, 2018. С. 6 – 8.

*У публікації автору належить проведення досліджень структури потоку та інтенсивності теплообміну в трубі із гофрованими вставками.*

12. Baskova O., Voropaiev G. Development Of The Discrete Vortex Structure In The Internal Flow At the Transition To Turbulence *VIII International conference on vortex flows mechanics* (China, X'ian, 15-18 October 2018). Сіань, 2018. Р. 9 – 10.

*У публікації автору належить проведення чисельне моделювання структури потоку та теплообміну в трубах різної геометрії.*

13. Воропаев Г.А., Загуменный Я.В., Баскова А.А. Численный анализ переходных процессов в пограничных слоях внутренних и внешних течений. *Final AMMODIT Conference «Mathematics for Life Sciences».* (Ukraine, Kyiv, March 18 - 22, 2019). Київ, 2019. С. 228 – 230.

*У публікації автору належить проведення та обробка результатів чисельних експериментальних досліджень структури потоку та інтенсивності теплообміну в гладкій трубі.*

14. Баскова О.О., Воропаев Г.О. Взаємозв'язок структури течії та інтенсивності теплообміну на початковій ділянці труби при перехідних числах Рейнольдса. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів.* Том 1. (Україна, м. Київ, 23–26 квітня 2019 р.). Київ, 2019. С. 127.

*У публікації автору належить підготовка та проведення чисельних експериментальних досліджень структури потоку та інтенсивності теплообміну в гладкій трубі та трубах із гофрованими вставками та аналіз отриманих даних.*

15. Bascova O.O. Flow structure formation in corrugated pipies at transient Reynolds numbers. *XIX International Conference «Dynamical system modelling and stability investigation».* (Україна, м. Київ, 22-24 травня 2019). Київ, 2019. Р. 8 – 9.

*Автор підготував та провів ряд чисельних експериментів по дослідженню особливостей течії в трубах з гофрованими вставками та вплив на неї неізотермічності потоку та числа Рейнольдса.*

## АНОТАЦІЯ

**Баскова О.О. Управління вихровим тепломасообміном в елементах енергетичного обладнання.** - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу геометрії поверхні, значення числа Рейнольдса та неізотермічності в пристінній області на енергоефективність початкових ділянок труб з гофрованими вставками при

перехідному режимі течії. Було досліджено виникнення та розвиток збурень в потоці в широкому діапазоні перехідних чисел Рейнольдса та їх вплив на теплообмінні процеси. Виявлено, що при певному співвідношенні безрозмірних довжин і амплітуд хвиль поверхні, віднесених до радіусу труби, гофровані вставки можуть бути як стабілізаторами течії на початковій ділянці труби, так і генераторами низькочастотних збурень при відповідному числі Рейнольдса, що призводить до раннього переходу до турбулентності та інтенсифікації тепловіддачі. Показано, що енергоефективність труб з гофрованими вставками «незагромаджуючого» типу можна визначати тільки через відношення чисел Нуссельта в трубі із гофрованою вставкою та в гладкій трубі, в зв'язку із тим, що додатковий опір труби із гофрованою вставкою «незагромаджуючого» типу не перевищує 7%, на відміну від гофрованих вставок «загромаджуючого» типу, де додатковий гідравлічний опір перевищує 15%. Визначено порогові значення довжини хвилі гофра і відповідної амплітуди, кута нахилу гофрування до вісі труби та довжини гофрованої ділянки для певного значення числа Рейнольдса, при якому досягається найбільша енергоефективність гофрованої вставки.

Ключові слова: течія в трубі, гофрування, інтенсифікація тепловіддачі, гідравлічний опір, структура течії, завихреність, градієнт динамічної в'язкості середовища, вихрова структура потоку.

## АННОТАЦІЯ

**Баскова А.А. Управление вихревым теплообменом в элементах энергетического оборудования.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 - Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния геометрии поверхности, значения числа Рейнольдса и неизотермичности в пристенной области на энергоэффективность начальных участков труб с гофрированными вставками при переходном режиме течения. Было исследовано возникновение и развитие возмущений в потоке в широком диапазоне переходных чисел Рейнольдса и их влияние на теплообменные процессы. Обнаружено, что при определенном соотношении безразмерных длин и амплитуд волн поверхности, отнесенных к радиусу трубы, гофрированные вставки могут быть как стабилизаторами течения на начальном участке трубы, так и генераторами низкочастотных возмущений при соответствующем числе Рейнольдса, что приводит к раннему переходу к турбулентности и интенсификации теплоотдачи. Показано, что энергоэффективность труб с гофрированными вставками «незагромождающего» типа можно определять только через отношение чисел Нуссельта в трубе с гофрированной вставкой и в гладкой

трубе, в связи с тем, что дополнительное сопротивление трубы с гофрированной вставкой «незагромождающего» типа не превышает 7 %, в отличие от гофрированных вставок «загромождающего» типа, где дополнительное гидравлическое сопротивление превышает 15%. Определены пороговые значения длины волны гофра и соответствующей амплитуды, угла наклона гофрирования к оси трубы и длины гофрированного участка для определенного значения числа Рейнольдса, при котором достигается наибольшая энергоэффективность гофрированной вставки.

Ключевые слова: течение в трубе, гофрирование, интенсификация теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, структура течения, завихренность, градиент динамической вязкости среды, вихревая структура потока.

## ANNOTATION

**Baskova O.O. Management of vortex heat and mass transfer in the elements of power equipment. - The manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty - 05.14.06 - Technical thermal physics and industrial power engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the problem of controlling the vortex flow structure by structuring the heat transfer surface in order to intensify heat transfer at minimal hydraulic losses in the range of transitional Reynolds numbers in the inlet section of a tube. The influence of the Reynolds number, geometric parameters of the surface and temperature gradient in the near-wall region on thermal and hydraulic processes is considered.

The occurrence and development of disturbances in the flow in a wide range of transitional Reynolds numbers is investigated. The range of Reynolds numbers has been determined, in which the introduction of corrugated inserts of the considered configuration improves the energy efficiency. The intensity of perturbations in a non-isothermal flow and isothermal flow at the same Reynolds number were compared. It is shown that the intensification of perturbations in a non-isothermal flow, compared with an isothermal flow at the same Reynolds number, is determined by the value of negative viscosity gradient of the medium relative the tube surface. The classical results of the influence of heat flux direction on values of heat transfer coefficients are numerically confirmed. There was obtained the analytical expression of the velocity profile dependent on the variable value of the medium dynamic viscosity, which has an inflection point inside the thermal boundary layer and satisfies the necessary condition for instability of the flow at decreasing dynamic viscosity of the medium.

It is shown that for certain ratios of dimensionless lengths and amplitudes of surface waves related to the tube radius, the corrugated inserts can be both stabilizers of the flow in the tube inlet section, or generators of low-frequency perturbations at

the corresponding Reynolds number, leading to an early transition to turbulence. So short-waved corrugated inserts interact weakly with the flow and have little effect on thermal processes in the wake behind them. Corrugated long-waved inserts at certain wavelengths and amplitudes, Reynolds numbers can impose a vortex structure on the flow, leading to a reduced rate of increase of amplitudes of the flow own disturbances. The number of waves in the corrugated insert required to establish a self-similar flow regime, depending on their length, was also determined.

The pressure drop values in a tube with a straight corrugated insert are obtained, which exceed the values in a smooth pipe by no more than 4% for configuration  $k_3 < 0,4$ , which makes it possible to determine the energy efficiency of pipes with a "non-clutter" type of corrugation by only the values of the Nusselt numbers. At introduction of the corrugated insert of "cluttering" type, the hydraulic resistance increases to 15%.

The threshold values of the corrugation wavelength and the corresponding amplitude, at which a significant increase in heat transfer occurs (in corrugated inserts of the "non-clutter type" up to 1.7 times, in corrugated inserts of the "clutter-free type" up to 2.1 times), were determined for the considered range of Reynolds numbers. The features of the vortex flow structure formation at the inlet section of a tube with a twisted corrugated insert at the threshold transitional Reynolds number are shown, in comparison with an axisymmetric corrugation under the same boundary conditions. Evaluation of energy efficiency at introduction of a twisted corrugated insert showed an increase in the heat transfer intensity in the corrugation zone and the tube outlet section up to 1.2 times, at increase in hydraulic resistance by 7%. In the considered range of geometrical parameters of twisted corrugation, the most energy efficient appeared the corrugation with the inclination angle  $\beta = 80^\circ$  at the Reynolds number  $Re = 5300$ .

It is shown that the local corrugated insert intensifies heat transfer in the wake behind it proportionally to its own length and geometrical parameters of the corrugation. In the case of the "cluttering" corrugation type of the considered geometric parameters, the dimensionless length of the intensified heat transfer zone with respect to the corrugated insert length is twice that of the "non-cluttered" corrugated inserts.

Keywords: flow in a tube, corrugation, heat transfer intensification, hydraulic resistance, flow structure, vorticity, gradient of dynamic viscosity, vortex flow structure.





Підписано до друку 13.12.2019 р.

Формат 60×84/16. Папір друк. Автор. арк. 1.1.

Друк трафаретний (різографія). Наклад 100 прим.

Надруковано в Інституті гідромеханіки НАН України.

03057, Київ – 57, вул Марії Капніст, 8/4.

