

Г. О. ВОРОПАЄВ, О. О. БАСКОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТКОВОГО ГОФРУВАННЯ НА РОЗВИТОК ВИХРОВИХ УТВОРЕНЬ В ТРУБІ ПРИ ПЕРЕХІДНИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

На даний час існує велика кількість досліджень, присвячена оцінці різних видів структурування поверхні з метою отримання найменшого гідрравлічного опору та/або найбільшого теплообміну. Зазвичай дослідження проводяться в певних діапазонах фізичних та геометричних параметрів шляхом перебору їх різних поєднань. Це доволі трудомісткий шлях, який займає багато часу та ресурсів. В даній роботі робиться спроба за вихідну точку обрати власні параметри потоку. Саме спираючись на форму та параметри власних збурень в потоці пропонується форма і геометричні характеристики розвинення поверхні. Часткове структурування обтічної поверхні дозволяє нав'язати лише певні зміни у природньому процесі розвитку збурень повністю його не змінюючи. Дослідження присвячено вивченню характеристик течії в гладкій трубі та трубі із гофрованими вставками. Комп'ютерне моделювання проводиться при перехідному числі Рейнольдса і за умов неізотермічності течії. Виконується пряме чисельне моделювання без застосування моделей турбулентності. На першому етапі проведено дослідження течії в гладкій трубі. Основну увагу приділено аналізу зародження та розвитку вихрових утворень, явищу втрати стійкості в потоці. Проаналізовано довжини хвиль збурень, амплітуди, відстань, на якій зароджуються та існують структуровані вихрові утворення згідно характерних етапів розвитку збурень. На другому етапі дослідження проведено порівняння із трубами з різними гофрованими вставками. Виявлено вплив довжини хвилі гофрування. Так, короткохвильове, у порівнянні із локальною довжиною хвиль власних збурень, гофрування може виступати як турбулізатор. В той же час, залежно від місця розташування, довгохвильове гофрування може надавати регуляризовуючу дію і навіть затягнути процес переходу. Також проаналізовано доцільність розташування двох гофрованих вставок заданої геометрії.

Ключові слова: течія в трубі, перехідні числа Рейнольдса, вихрові збурення, розвиток збурень, неізотермічний потік, часткове гофрування.

G. O. VOROPAIEV, O. O. BASKOVA

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PARTIAL CORRUGATION ON THE DEVELOPMENT OF VORTEX STRUCTURES IN A TUBE AT A TRANSIENT REYNOLDS NUMBERS

Currently, a significant number of studies are dedicated to evaluating various types of surface structuring aimed at achieving minimal hydraulic resistance and/or maximal heat transfer. Typically, such studies are conducted within certain ranges of physical and geometrical parameters by iterating through different combinations. This is a rather labor-intensive approach that requires considerable time and resources. In the present work, an attempt is made to use the inherent flow parameters as a starting point. Based on the form and characteristics of the natural disturbances in the flow, a corresponding shape and geometric configuration of surface development is proposed. Partial structuring of the streamlined surface allows for the imposition of specific modifications to the natural process of disturbance development without completely altering it. The study focuses on analyzing the flow characteristics in a smooth pipe and in a pipe with corrugated inserts. Computational simulations are carried out at transitional Reynolds numbers under non-isothermal flow conditions. Direct numerical simulation (DNS) is performed without employing turbulence models. In the first stage, the flow in a smooth pipe is investigated. The main focus is on the analysis of the onset and development of vortex structures, as well as the phenomenon of flow instability. The wavelengths, amplitudes, and distances at which structured vortex formations originate and exist are analyzed according to the characteristic stages of disturbance development. In the second stage, a comparison is made with pipes containing various corrugated inserts. The influence of the corrugation wavelength is identified. For example, short-wavelength corrugation – relative to the local wavelength of the inherent flow disturbances – can act as a turbulizer. At the same time, depending on the location, long-wavelength corrugation can have a regularizing effect and even delay the transition process. Additionally, the feasibility of placing two corrugated inserts of a given geometry is analyzed.

Key words: flow in a tube, transitional Reynolds numbers, vortex disturbances, development of disturbances, non-isothermal flow, partial corrugation.

Вступ. Задачі управління потоком постають в самих різних галузях промисловості. Вимоги щодо мінімізації гідрравлічного опору є ключовими для авіації, морського транспорту, енергетичної галузі, енергетичного машинобудування тощо. Складність розвитку поверхонь із отриманням потоків заданих характеристик зумовила появу великої кількості досліджень. Проте, навіть і сьогодні, ще не вироблений остаточно єдиний методологічний підхід для створення ефективних в гідрравлічному та/або енергетичному аспектах обтічних поверхонь.

Управління характеристиками потоку в різному обладнанні здійснюється в залежності від потрібних функціональних параметрів. Методи управління потоками підрозділяють на *енергозатратні* – активні та пасивні. Зміну форми і якості обтічних поверхонь відносять до пасивних засобів цілеспрямованої зміни параметрів устаткування з метою підвищення енергоефективності. Але для досягнення найбільшого ефекту необхідно мати базові параметри, відносно яких потрібно покращувати характеристики обладнання. Тому спочатку аналізують закономірності течії в устаткуванні на підставі гладкого каналу при певних числах Рейнольдса.

В довільному потоці завжди виникають малі збурення різних масштабів, але вони чи згасають під впливом в'язкості рухомої рідини, чи набувають певних значень, що веде з часом до турбулізації потоку. Розвиток і трансформація зумовлені параметрами потоку, умовами роботи обладнання і можуть відбуватися по-різному в залежності від числа Рейнольдса. При формуванні структури внутрішніх осесиметричних течій можна умовно виділити ряд етапів. На першому етапі (за умов ударного входу, але безвідриного) на поверхні труби розвивається примежовий шар, і товщина його є дуже малою у порівнянні із радіусом труби. Для оцінки зростання збурень потоку можна скористатися *лінійною двовірною теорією гідродинамічної стійкості*, всупереч тому, що для *профіля Пуазейля* лінійна теорія стійкості показує стійкість осесиметричних збурень. Таким чином, в примежовому шарі на поверхні початкової ділянки ($L/d < 50$) труби формуються умови втрати стійкості потоку в трубі, зумовлені саме властивістю розповсюдження *дискретних хвиль Толлміна – Шліхтинга* при відповідних числах

Рейнольдса [1]. Визначальну роль тут відіграють відповідні довжини цих хвиль і фазові швидкості власних збурень примежового шару [2]. Для гладких труб характерним є *порогове значення* числа Рейнольдса втрати стійкості $Re_d \sim 6000$ [3]. Однак, по досягненню певних значень *амплітуд збурень* починається процес нелінійного етапу переходу, коли положення лінійної теорії не працюють. Цей етап характеризується кінцевими значеннями амплітуд збурень тиску та швидкості, їх впливом на розподіл швидкості і тиску в трубі, що неможливо оцінити без розв'язання *тривимірної нестационарної системи рівнянь Нав'є – Стокса*. На цьому етапі процесу переходу в трубі трансформування хвилі завихреності у примежовому шарі нагадують гофровані тороподібні вихрові структури [4]. Певний час ці майже *детерміновані структури* зберігають форму, зростаючи в розмірах перерізу, що приводить до *немонотонності профіля осередненої швидкості* і майже нульового *градієнту тиску* вздовж труби. Але цей відрізок недовгий. Наступний етап – етап руйнування тороподібних вихрових утворень із перетворенням у повздовжні вихрові структури, які вже відрізняються від λ – *образної вихрової структури* в примежовому шарі на пластині. Вважається, що в трубі трансформаційні процеси відбуваються швидше, оскільки вільний простір в перерізі труби по мірі розвитку збурень зменшується [2]. Тому на початкових ділянках труб довжиною L при $Re_L < 10^6$ можна затягнути область переходу за рахунок підтримки стійкості великомасштабних, відносно радіуса труби, тороподібних вихрових структур і змінити термодинамічні параметри технічного обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Форма поглиблення гофрованої вставки обумовлює локальні характеристики потоку. Поодинокі гофри, які звужують локально перетин труби, сприяють формуванню вихрових структур вниз за течією після виступу [5]. Механізм формування схожий на розвиток вихрових структур всередині траншеї на пластині. Стійкість та форма таких утворень істотно залежать від відстані між заглибленнями. В свою чергу, вони впливають на теплогідрравлічні параметри потоку. Збільшення теплообміну та опору тертя залежать від числа Рейнольдса, глибини заглиблення і можуть сягати 2х разів із збільшенням гідрравлічного опору до 84%.

Введення гофрування, яке розширює переріз, призводить до появи штучно створених вихрових структур всередині поглиблень [6, 7]. Форма та інтенсивність даних вихрових утворень залежать безпосередньо від заглиблень, де вони сформувалися. Також істотною є залежність від числа Рейнольдса. Але при цьому саме критичне число Рейнольдса залежить від типу гофрування [6]. Для низьких значень чисел Рейнольдса (порядку 200) введення *витого гофрування*, попри виникнення значних за інтенсивністю вихрових структур, не призводить до істотного збільшення конвективного теплообміну та затягує перехідний процес [6]. За чисел Рейнольдса порядку 800 вите та пряме гофрування мають однаковий вплив на *число Нуссельта* і його збільшення у порівнянні із гладкою трубою, не перевищує 30%. При перехідних та турбулентних числах Рейнольдса дослідження авторів [7] показало, що вите гофрування дозволяє збільшити число Нуссельта до 250%. Проте аналіз даних досліджень різних авторів по рівню інтенсифікації теплообміну, наведений в [7], показав істотні (до 1,75 разів) відмінності, незважаючи на схожі безрозмірні параметри геометрії та діапазон чисел Рейнольдса.

Отже, отримання вискоефективної геометрії сильно залежить від вдалого поєднання параметрів поверхні із діапазоном граничних умов. Багато досліджень побудовано на підході простого перебору різноманітних геометричних параметрів та граничних умов із винайденням оптимального рішення. В даному дослідженні ми робимо спробу першим кроком проаналізувати параметри вихрової структури в гладких трубах. А вже на основі отриманих даних запропонувати форму і розміри розвиненої поверхні.

Постановка задачі. Досліджується труба діаметром $d = 70$ мм, довжиною $l = 3180$ мм ($l/d = 45,5$). Гофрована вставка має довжину $280 - 300$ мм ($4 \dots 4,29$) d . Довжина ділянки від входу в трубу до гофрованої вставки змінювалась і складала $l/d = 7$ та 21 відповідно. Досліджувались гофровані вставки довжиною хвилі $\lambda_{гоф} = 20 \dots 60$ мм, амплітудою $a = 3$ мм. Розглядалися ділянки труби з однією та двома гофрованими вставками (рис. 1). Відстань між вставками складала $\sim 10d$.

Дослідження проводилося при наступних граничних та початкових умовах:

- 1) на вході задавалась постійна швидкість, яка відповідала числу Рейнольдса $Re = 7000$, та постійна температура $T_f = 333$ K ;
- 2) на стінках труби задавались умови прилипання та постійна температура $T_w = 283$ K ; на виході з труби задавались так звані «м'які» граничні умови – *умови Neumann*.

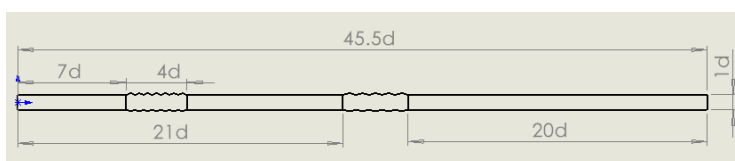


Рис. 1 – Геометрія досліджуваної ділянки.

Математична модель. Дослідження проводилося шляхом безпосереднього розв'язання системи рівнянь руху, енергії та нерозривності (1 – 3) без застосування моделей турбулентності:

– рівняння Нав'є – Стокса:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right), \quad (1)$$

$i, j = 1 \dots 3$;

– нерозривності:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (2)$$

– рівняння енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) + \frac{\mu}{2c_p \rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2; \quad (3)$$

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, зважаючи на неізотермічну постановку задачі для розглянутого діапазону температур описується поліномом [8]:

$$\mu = 2,622 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,1783 \cdot T + 30,767 [kg/(m \cdot s)].$$

Початкові умови відповідали умовам на вході в трубу.

У дослідженні використовувались:

- метод кінцевого об'єму;
- метод роздільного рішення основних рівнянь (Pressure Based);
- неявна схема лінеаризації рівнянь;
- схема «проти потоку» другого порядку;
- схема інтерполяції рівняння корекції тиску другого порядку;
- алгоритм зв'язку полів швидкостей і тисків – SIMPLEC з коефіцієнтами релаксації для тиску – 0,3, для моменту – 0,7, для енергії і густини – 1.

Кількість комірок обчислювальної сітки становила близько 6 млн, з більш дрібними розмірами комірок біля стінок і в заглибленнях (рис. 2). Оскільки в цьому дослідженні для нас цікавими були досить великомасштабні вихрові структури, обмеження на розмір комірок не були визначальними.

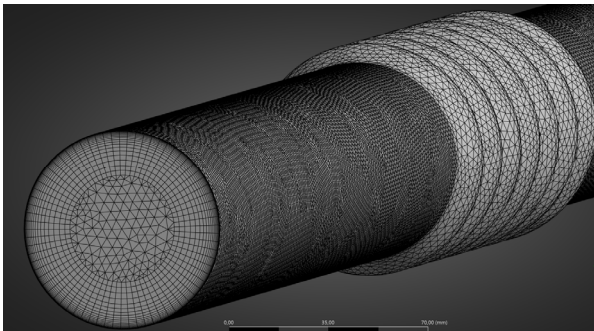


Рис. 2 – Фрагмент сітки розбиття досліджуваної області.

виникненню збурень і їх початку розвитку.

Наступні етапи нелінійного переходу:

- етап розвинення детермінованої хвилі тиску і завихреності тороподібної форми: $7 \leq x/d \leq 15$ ($49000 < Re_x < 105000$);
- етап руйнування детермінованою вихровою структурою $x/d > 16$ ($Re_x > 1.1 \cdot 10^5$).

Виходячи з припущення, що при ударному вході в трубу, як на передній кромці обтічної пластини, так і в потоці присутній весь спектр частот власних збурень примежового шару та враховуючи їх малу величину, високочастотні збурення швидко згасають, що і показує Q – візуалізація розрахунків. Низькочастотні збурення залишаються у примежовому шарі. Їх поширення вниз за течією реєструються при відповідному числі Рейнольдса у вигляді дискретних біжучих хвиль певної довжини і фазової швидкості. Так на ділянці $x/d \leq 15$ на підставі результатів розрахунку можна виділити сформовані дискретні хвилі довжиною λ від 0,035 м до 0,045 м ($\lambda/\delta = 3-4,7$) при середньому значенні фазової швидкості $c = (0,057 \dots 0,06)$ м/с, що майже відповідає хвилі Толміна – Шліхтинга в примежовому шарі (рис. 3, а). На наступній ділянці труби результати розрахунку показу-

Результати комп'ютерного моделювання. Процес появи і розвитку збурень в примежовому шарі на гладкій плоскій поверхні і на початку гладких труб має багато спільного за умови, що товщина примежового шару, яка формується на поверхні труби, залишається меншою за радіус труби [8]. Тому процес переходу від ламінарного до турбулентного режиму течії в трубі можна умовно поділити на етапи переходу:

- етап зародження коливань: $x/d \leq 2$ ($Re_x < 14000$);
- етап розвитку регулярних осесиметричних хвиль тиску і завихреності: $2 \leq x/d \leq 7$, ($14000 < Re_x < 49000$), які майже повністю відповідають лінійній теорії стійкості

ли хаотизацію потоку із появою дискретних збурень, що визначається спектром (рис. 3, а), який сформований по часовому значенню тиску в кінці труби.

На рис. 3, б наведена часова залежність напруження тертя на відстані 7 калібрів від входу в трубу, по якій визначений спектр, який демонструє появу дискретного збурення з частотою 1,71 Гц (рис. 3, в) з довжиною хвилі 0,033 м.

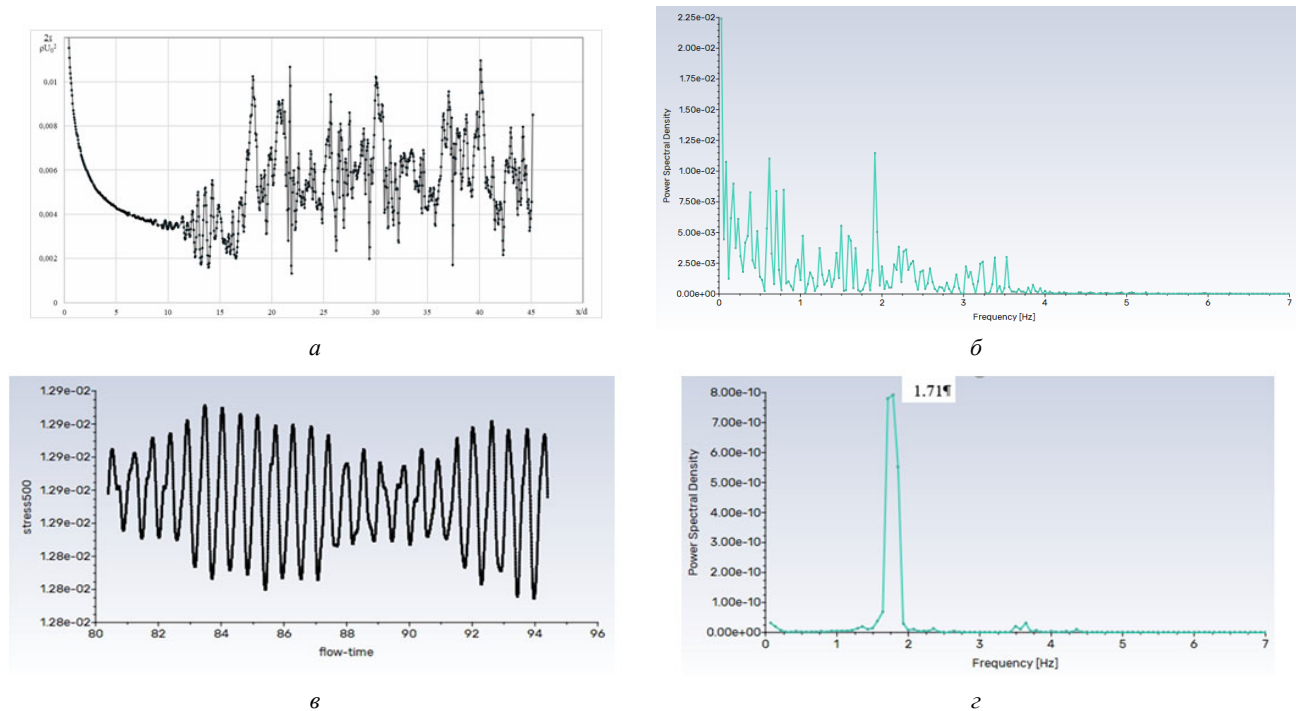


Рис. 3 – а – Миттєві напруження тертя в гладкій трубі; б – часова залежність напруження тертя на відстані семи калібрів; в – відповідний запис сигналу на відстані $x/d = 7$; г – спектри частот для значень тиску біля виходу з гладкої труби та значень напруження тертя.

Мінімальна довжина хвилі серед зареєстрованих хвиль у трубі склала $\lambda = 0,035$ м, тому була спроба нав'язати потоку цю довжину хвилі гофрованою вставкою в гладку поверхню труби довжиною приблизно $0,5\lambda$.

Перший варіант досліджуваної геометрії – розміщення гофрованої вставки на відстані $x/d = 20$ з метою недопущення наступної хаотизації прилежового шару. Як можна бачити з графіка миттєвих напружень тертя (рис. 4, а), хаотичний характер збурень зберігається, амплітуда коливань також майже не змінюється, як і їх частотні характеристики (рис. 4, б).

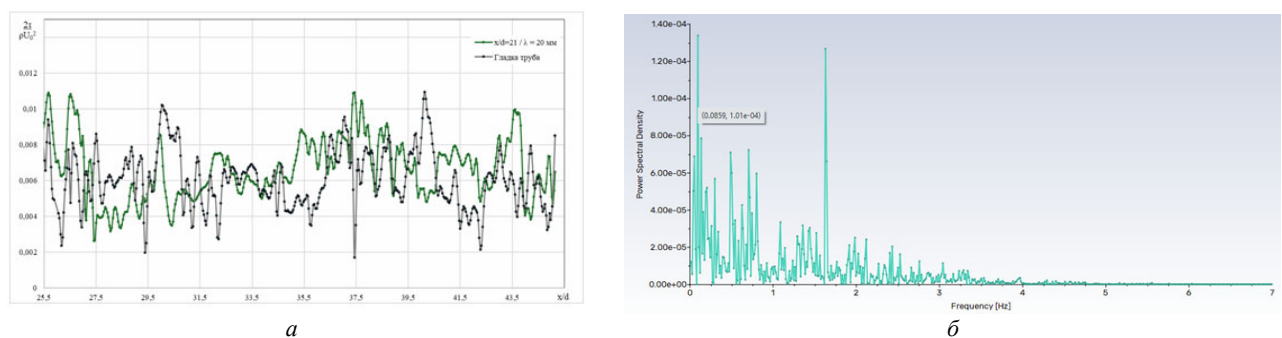


Рис. 4 – а – Миттєві напруження тертя в трубі із гофрованою вставкою $\lambda = 20$ мм, відстань від входу $x/d = 21$; б – спектри частот для значень тиску біля виходу.

Збурення, яке утворюється в заглибленні поверхні і фіксується в потоці, обмежено довжиною гофрованої вставки. Дана геометрія гофрування генерує стаціонарні збурення, які слабо взаємодіють із більшим за довжиною хвилі збуренням в основному потоці і не спроможні його змінити, коли перехід до турбулентного режиму майже завершено. Це можна побачити на температурній візуалізації потоку як в гофрованій вставці, так і на відповідній ділянці гладкої труби (рис. 5, а, б). Але у спектрі, хоча значення низькочастотної частини спектру майже однакові, можна відмітити зниження частоти максимальної щільності в трубі із гофром з $f = 1.9$ Гц до

$f = 1.5 \text{ Гц}$ і меншу щільність для більших частот, що, в свою чергу, свідчить про меншу швидкість хаотизації потоку.

Наступний варіант розміщення гофрованої вставки довжиною $0,5\lambda$ на відстані $x/d = 7$, де в гладкій трубі ще зберігається регулярна структура збурень. Отримані дані миттєвих значень напруження тертя показали, що нове розміщення вставки принципово не змінює збурення напружень, але фіксується суттєве низькочастотне збурення в потоці (рис. 6).

Таким чином, зупинити дроблення хвиль і хаотизацію потоку або запобігти цьому процесу з допомогою структурованої поверхні з довжиною хвилі гофру, яка менше мінімальної довжини регулярної власної хвилі процесу конвективного переходу, поки що не вдається.

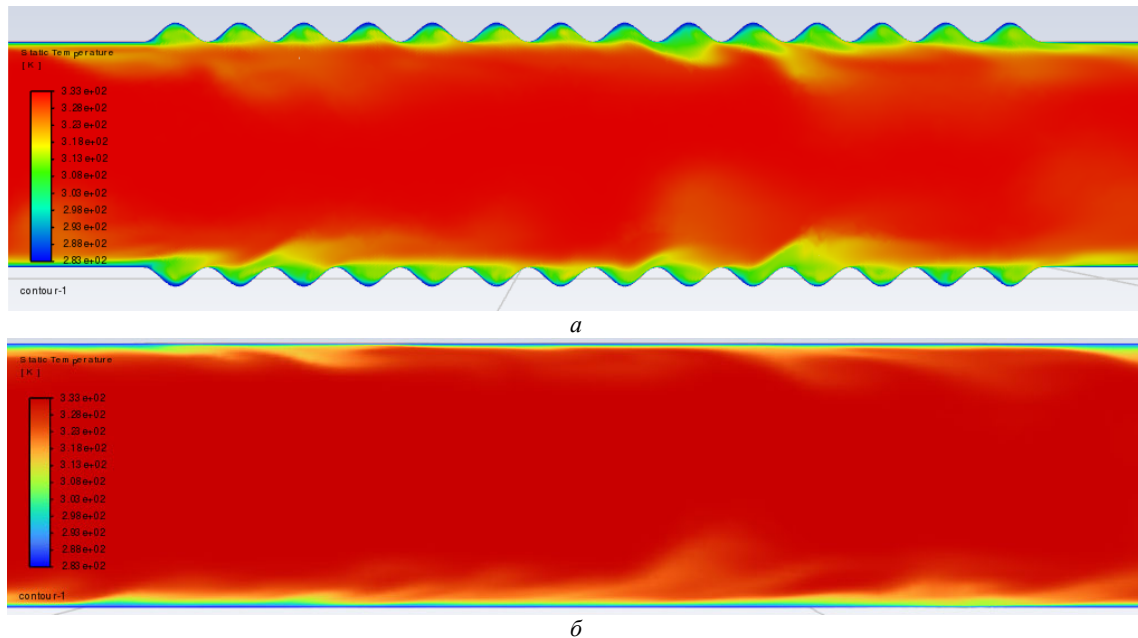


Рис. 5 – Температурні поля в трубі: *a* – із гофрованою вставкою; *b* – в гладкій трубі.

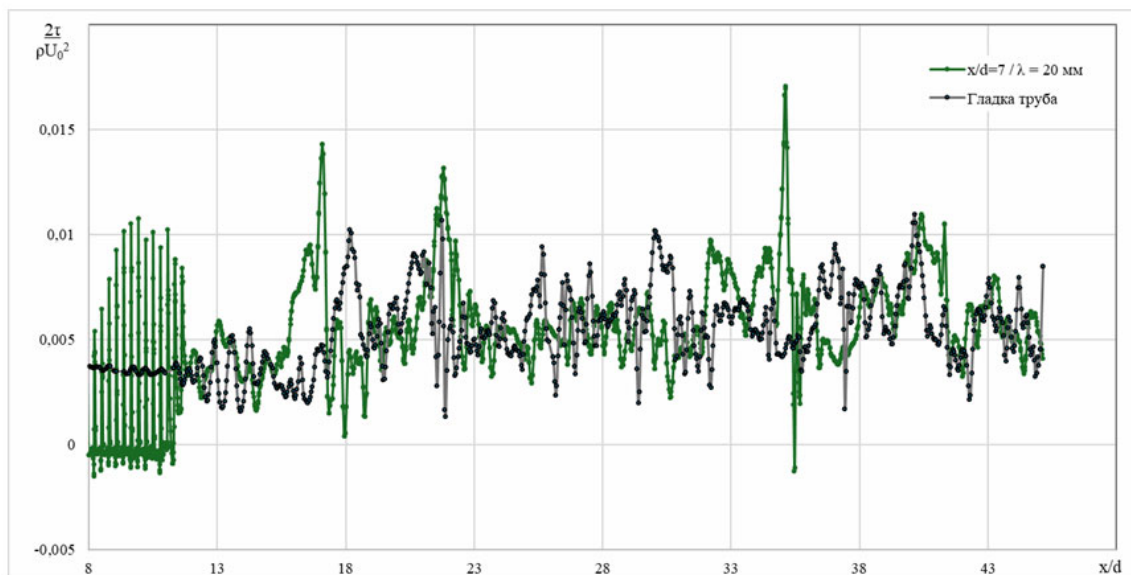


Рис. 6 – Миттєві напруження тертя в гладкій трубі та труб із гофрованою вставкою $\lambda = 20 \text{ мм}$, відстань від входу $x/d = 7$.

Тому було вивчено вплив на процес переходу гофрованої вставки з довжиною хвилі гофра, яка дорівнює мінімальній довжині регулярної власної хвилі λ .

Розміщення цієї гофрованої вставки за зоною, де хвилі власних збурень знаходяться на стадії формування і набувають певних значень, призводить до збільшення ділянки існування структурованих тороподібних структур з 8 калібрів до 15,5 калібрів, що демонструє розподіл миттєвих значень напружень тертя (рис. 7).

Взаємодія вихорів, породжених гофруванням, із власними коливаннями призвела до зменшення амплітуд коливань вниз по потоку (рис. 7) внаслідок явища інтерференції власних і вимушених коливань та суттєвої зміни

спектру вниз по потоку (рис. 8, а, б). В спектрі явно домінує частота збурень, генерованих гофрованою вставкою.

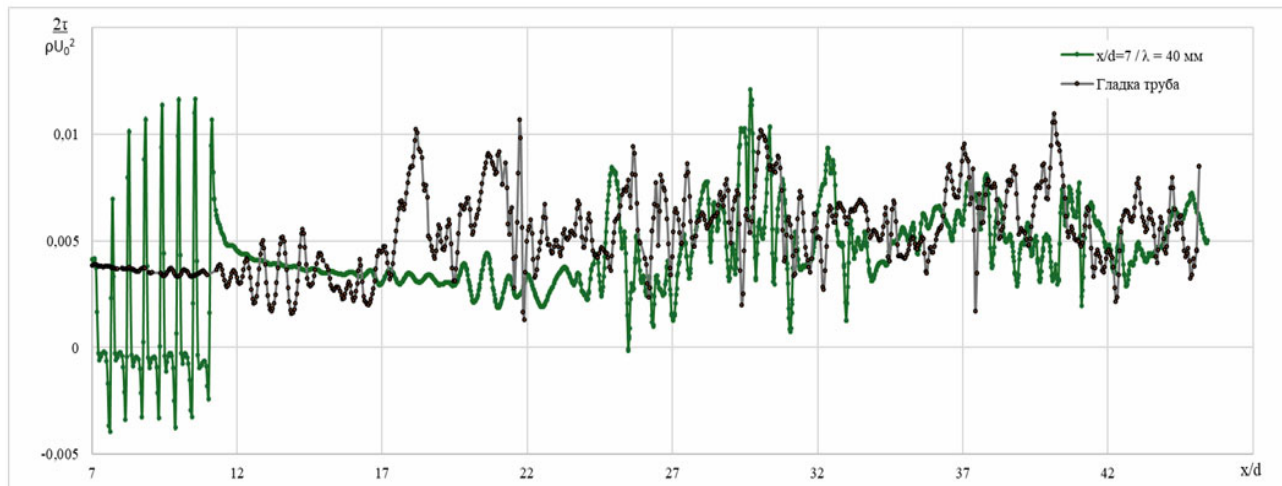


Рис. 7 – Напруження тертя в гладкій трубі та трубі із гофрованою вставкою $\lambda = 40$ мм, відстань від входу $x/d = 7$.

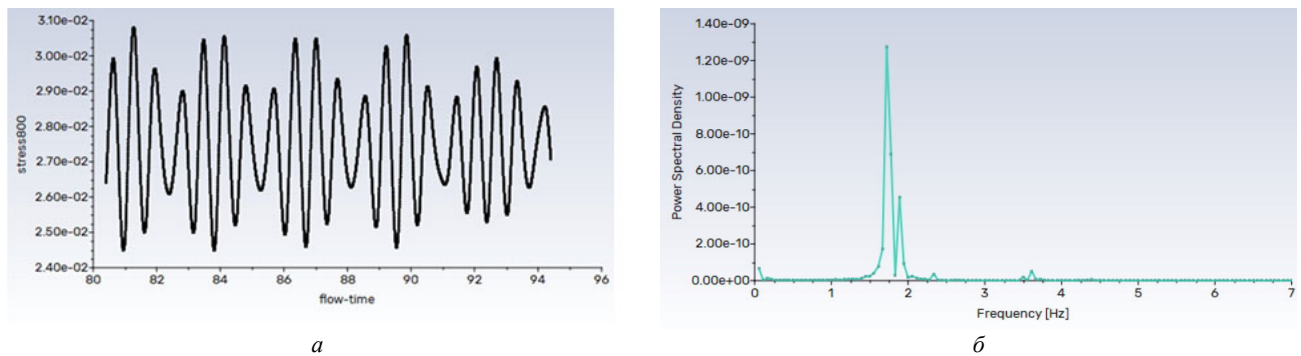


Рис. 8 – а – Зміна значень напруження тертя у часі в трубі із гофрованою вставкою $\lambda = 40$ мм;
б – відстань від входу $x/d = 7$ та їх спектральні характеристики.

Відповідно наступним кроком було введення другої гофрованої вставки на відстані від входу у трубу $x = 21,5d$ з метою упередження процесу хаотизації збурень з більшою довжиною хвилі гофра 2λ (60 мм).

Однак зберегти регулярний характер збурень до кінця труби виявилося неможливим. Перехідні процеси з характерним видовженням збурень з подальшим утворенням веретеноподібних структур почалися вже всередині гофрованої вставки, що можна побачити з Q – візуалізації на (рис. 9, а, б).

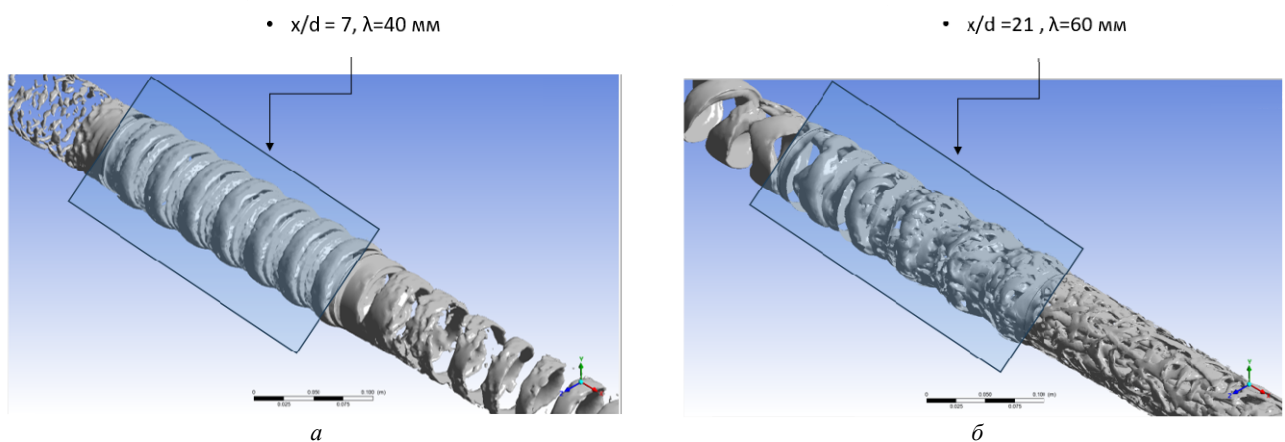


Рис. 9 – Q – візуалізація течії в трубі на ділянці гофрування: а – $\lambda = 40$ мм гофрування; б – $\lambda = 60$ мм гофрування.

На виході з гофрованої вставки було отримано вже характерну для завершення перехідних процесів в потоці хаотичну вихрову структуру. Але, якщо поглянути на амплітуди коливань значень тертя, то вони є меншими, у порівнянні із відповідними ділянками гладкої труби (рис. 10).

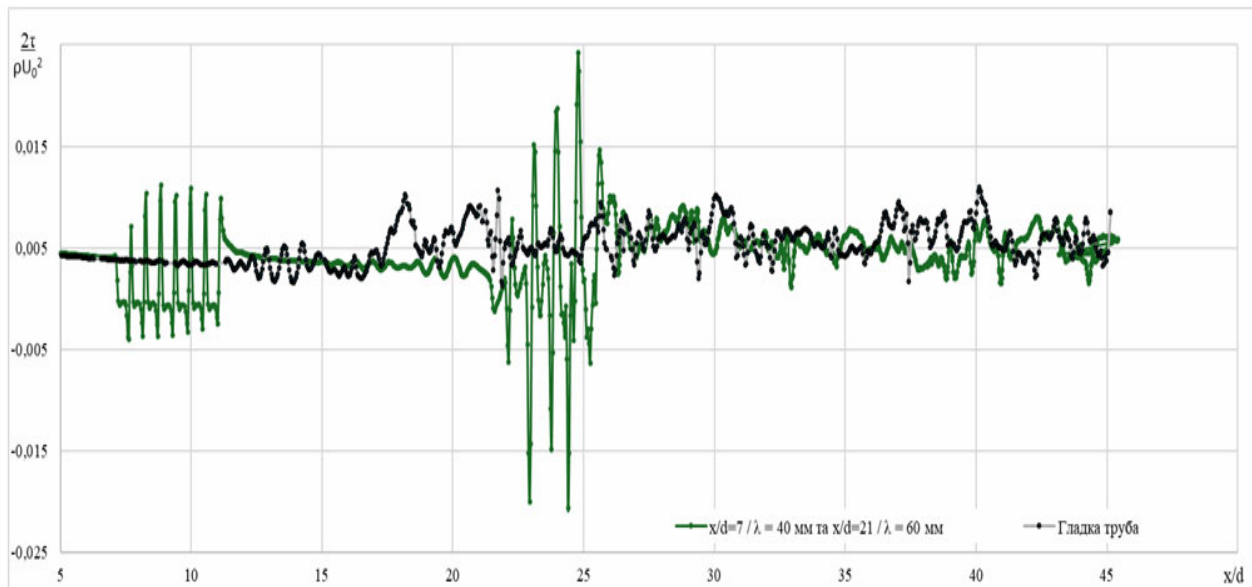


Рис. 10 – Напруження тертя в гладкій трубі та трубі із гофрованою вставкою $\lambda = 40$ мм та $\lambda = 60$ мм , відстань від входу $x/d = 7$ та 21 .

Отже, можна відмітити існування впливу другої вставки на потік, що проявляється в слабкій регуляризуючій дії. Зважаючи на це, доцільно буде спробувати встановити другу гофровану вставку із довжиною хвилі 40 мм або 50 мм .

Перспективи подальших досліджень. Автори вважають, що для продовження вивчення впливу гофрування поверхні труби, яке генерує в потоці осесиметричні збурення фіксованої довжини, на процеси розвитку природних збурень при фіксованих числах Рейнольдса необхідні додаткові дослідження з виявленням специфіки стійкості виникаючих тороїдальних структур. Для цього потрібні нові методи розрахунку, в тому числі підвищення порядку різницевих методів, а також перехід на модифіковані моделі турбулентності, адаптовані для низьких чисел Рейнольдса.

Висновки. При проведенні чисельного експерименту було показано як геометричні характеристики гофрування впливають на розвиток власних збурень в потоці при перехідних числах Рейнольдса. Було винайдено характеристики збурень, які зароджуються та розвиваються в гладкій трубі при $Re = 7000$, та проведений аналіз впливу збурень, генерованих гофрованими вставками, із довжинами хвиль відповідними власним, які виникають в трубі при відповідному числі Рейнольдса. Показано визначальну роль довжин хвиль збурень на їх спроможність створювати умови зміни власних збурень потоку в залежності від місця їх розташування в трубі.

Список літератури

1. Klebanoff P. S., Tidstrom K. D. The three-dimensional nature of boundary-layer transition // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1962. – Vol. 12. – P. 1 – 34. DOI: 10.1017/S0022112062000014.
2. Darbyshire A. G., Mullin T. Transition to turbulence in constant-mass-flux pipe flow // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1995. – Vol. 646. – P. 127 – 136. DOI: 10.1017/s0022112095001248.
3. Ovchinnikov V., Meelan M., Choudhari, Ugo Piomelli. Numerical simulations of boundary-layer bypass transition due to high-amplitude free-stream turbulence // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2008. – Vol. 613. – P. 135 – 169. DOI: 10.1017/S0022112008003017.
4. Воронаєв Г. О., Баскова О. О. Моделювання процесу переходу в трубах із спіральним гофруванням // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. – 2019. – № 8(1333). – С. 75 – 81.
5. Li X., Liu S., Mo X., Sun Z., Tian G., Xin Y., Zhu D. Investigation on Convection Heat Transfer Augment in Spirally Corrugated Pipe // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 1063. DOI: 10.3390/en16031063.
6. Rainieri S., Pagliarini G. Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2002. – Vol. 45. – P. 4525 – 4536. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00156-4.
7. Vicente P. G., Garc A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47. – P. 671 – 681. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.005.
8. Voropaiev G. A., Baskova O. O. Some features of a laminar flow stability loss in a pipe // *Journal of Numerical and Applied Mathematics*. – 2021. – Vol. 135. – No. 1. – P. 59 – 65. DOI: 10.17721/2706-9699.2021.1.07.

References (transliterated)

1. Klebanoff P. S., Tidstrom K. D. The three-dimensional nature of boundary-layer transition. *Journal of Fluid Mechanics*. 1962, Vol. 12, pp. 1–34. DOI: 10.1017/S0022112062000014.
2. Darbyshire A. G., Mullin T. Transition to turbulence in constant-mass-flux pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1995, Vol. 646, pp. 127–136. DOI: 10.1017/S0022112095001248.
3. Ovchinnikov V., Meelan M., Choudhari, Ugo Piomelli. Numerical simulations of boundary-layer bypass transition due to high-amplitude free-stream turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008, Vol. 613, pp. 135–169. DOI: 10.1017/S0022112008003017.
4. Voropaiev G. A., Baskova A. A. Modelyuvannya protsessu perekhodu v trubakh iz spiral'nym gofruvannyam [Modeling of transition process in tubes with spiral corrugation]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya : Matematychnye modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. 2019, Vol. 8(1333), pp. 75–81.
5. Li X., Liu S., Mo X., Sun Z., Tian G., Xin Y., Zhu D. Investigation on Convection Heat Transfer Augment in Spirally Corrugated Pipe. *Energies*. 2023, Vol. 16, P. 1063. DOI: 10.3390/en16031063.
6. Rainieri S., Pagliarini G. Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002, Vol. 45, pp. 4525–4536. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00156-4.
7. Vicente P. G., Garc A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004, vol. 47, pp. 671–681. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.005.
8. Voropaiev G. A., Baskova O. O. Some features of a laminar flow stability loss in a pipe. *Journal of Numerical and Applied Mathematics*. 2021, Vol. 135, No. 1, P. 59–65. DOI: 10.17721/2706-9699.2021.1.07.

Надійшла (received) 05.05.2025

Відомості про авторів / Information about authors

Воропаєв Геннадій Олександрович – доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: +38(044) 371-65-17; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5615-6344>; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

Voropaiev Gennadii Oleksandrovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director Institute of Hydromechanics National Academy of Sciences of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: +38(044) 371-65-17; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5615-6344>; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

Баскова Олександра Олександрівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, асистент, Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (068) 198-93-75; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-8995>; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.

Baskova Oleksandra Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences, senior researcher, assistant Institute of Hydromechanics National Academy of Sciences of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (068) 198-93-75; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-8995>; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.