

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.3.175745

УДК 532.542

Г.О. Воропаєв\*, О.О. Баскова  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна  
\*corresponding author: voropaiev.gena@gmail.com

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ ТЕЧІЇ НА ПОЧАТКОВІЙ ДІЛЯНЦІ ТРУБИ

**Проблематика.** Підвищення енергоефективності теплообмінних апаратів можливе завдяки розвиненню поверхні теплообміну і зміні режиму течії з метою зменшення гідравлічних втрат. Процеси переходу з ламінарного в турбулентний режим, як і з турбулентного в ламінарний, залежать від великої кількості факторів, у тому числі від температурного, який впливає на в'язкість потоку і, відповідно, на число Прандтля. Ще однією особливістю перехідного режиму течії є різкий характер зміни в інтенсивності теплообміну навіть за невеликих змін у числі Рейнольдса, що створює певні труднощі в роботі з ним.

**Мета дослідження.** Дослідити процеси втрати стійкості та переходу до турбулентного режиму на початковій ділянці труби з частково розвинутою поверхнею. Визначити вплив температурного фактора на взаємозв'язок гідравлічних і теплових параметрів потоку.

**Методика реалізації.** Числовий експеримент із застосуванням методу прямого числового моделювання (DNS) засобами програмного забезпечення Ansys Fluent.

**Результати дослідження.** Визначено порогові значення температурного напору, за яких потік у трубі даної довжини, при заданому числі Рейнольдса, втрачає стійкість. Визначено залежності тимчасових і просторових масштабів виникаючих збурень і швидкості їх зростання залежно від поєднання числа Рейнольдса і температурного напору. Показано взаємозв'язок значень напруження тертя із величинами теплового потоку. Отримано динамічні й теплові характеристики потоку в області гофрованої поверхні, на підставі яких визначено порогові значення температурного напору, за яких часткове гофрування є енергоефективним.

**Висновки.** Зростання температурного напору приводить до більш ранньої генерації та інтенсифікації вихрового руху, що обумовлює зростання конвективного теплообміну за фіксованого числа Рейнольдса. Розміщення гофрованої вставки відносно місця зародження кінцевих збурень, разом із геометрією гофрування, істотно змінює динамічні та теплові характеристики потоку.

**Ключові слова:** течія в трубі; стійкість потоку; інтенсифікація теплообміну; гофрування; початкова ділянка труби; температурний напір; число Прандтля.

### Вступ

Процеси турбулізації ламінарних течій та ламінаризації турбулентних течій мають досить складний характер, що залежить не тільки від числа Рейнольдса, яке визначається за витратними характеристиками, а й від виду та якості обтічної поверхні, а також змінності фізичних параметрів середовища в неізотропічних течіях. Ця обставина може визначати різку зміну інтенсивності тепловіддачі за незначної зміни витратних чисел Рейнольдса [1]. Як правило, це пов'язано зі зміною режиму течії в обладнанні, а з огляду на те, що основна частина теплообмінного обладнання працює при витратному турбулентному режимі течії, вимога ефективності теплообмінного обладнання визначає напрям досліджень, за яких можна підвищувати теплообмін при збереженні або зменшенні витрат теплоносія. Вимога стабільності до ефективної роботи теплообмінного обладнання в

харчовій та хімічній промисловості, в системах, що працюють із поновлюваними джерелами енергії, де режим течії може змінюватися при зміні не тільки витрати, але й температурного напору, зберігає актуальність цього напряму досліджень.

Застосування методів пасивної інтенсифікації теплообміну, таких як часткове структурування поверхні, дає змогу досягати тих же значень коефіцієнтів теплообміну, що й за турбулентного режиму, при цьому гідравлічні втрати будуть нижчими, ніж при турбулентному режимі течії. Однак цей ефект реалізується тільки за певної структури течії, яка істотно залежить від геометрії теплообмінної поверхні та фізичних властивостей теплоносія, від числа Рейнольдса і протяжності теплообмінної ділянки. На структуру течій впливає не тільки значення фізичних властивостей теплоносія, а й їх змінність у напрямку теплообмінних поверхонь, що особливо проявляється за великих температурних

напорів. Так, негативний градієнт в'язкості обумовлює структуру пристінних течій води та сприяє появі збурень у потоці, що зумовлює початок перехідних процесів [2] у певному діапазоні чисел Рейнольдса, а з появою низько-частотних збурень пов'язана і зміна інтенсивності теплообміну.

Результати взаємного впливу в'язкості середовища і геометрії обтічної поверхні на теплообмінні та гідродинамічні процеси в трубах представлені в працях [3–8]. У роботі [3] досліджувався вплив зміни шорсткості поверхні й числа Прандтля на теплові та гідродинамічні параметри труб. За фіксованих геометричних параметрів збільшення числа Прандтля приводило до збільшення енергоефективності теплообмінної поверхні та змінювало характер залежності між коефіцієнтами теплообміну і тертя. Дані дослідження [4], присвяченого вивченню теплообміну і тертя в трубах із періодичною рівномірною шорсткістю, показали діапазон геометричних параметрів шорсткості, де вплив числа Прандтля на інтенсивність теплообміну проявляється найбільшою мірою. Автори роботи [5] досліджували інтенсифікацію теплообміну в каналі з несиметричним синусоїдальним гофруванням при ламінарному та перехідному режимах течії. Істотна інтенсифікація теплообміну була досягнута тільки при перехідному режимі течії. При цьому збільшення числа Прандтля зумовлювало істотне збільшення числа Нуссельта і не приводило до змін у гідравлічних втратах. У ламінарному режимі течії збільшення числа Прандтля приводило як до інтенсифікації тепловіддачі, так і до істотного зменшення витрат на прокачування теплоносія. У [6] показано, що існує певне відношення довжини труби до її діаметра ( $L^*$ ), за якого досягається максимальна теплопередача по перерізу. Це значення збільшується зі збільшенням значень чисел Рейнольдса та Прандтля. Результати дослідження впливу зміни числа Прандтля в трубах з витим синусоїдальним гофруванням наведені в [7]. На основі аналізу інтенсивності теплообміну за п'яти значень числа Прандтля була отримана залежність  $Nu \sim Pr^{0,44}$ , з якої випливає, що збільшення числа Прандтля приводить до інтенсифікації теплообміну в гофрованих трубах розглянутих геометричних параметрів. Дослідження впливу неізотермічності потоку на початковій ділянці гофрованої труби, наведене в [8], показало вплив градієнта в'язкості на ступінь інтенсифікації теплообміну і початок перехідних процесів у трубі завдяки інтенсифікації

збурень у пристінній зоні, що генеруються гофруванням. Продовженням досліджень впливу градієнта в'язкості на гідродинамічні та теплові процеси в трубі при перехідному режимі течії є запропонована робота.

### Постановка задачі

Основною метою дослідження є вивчення процесів втрати стійкості та переходу до турбулентного режиму на початковій ділянці труби з частково гофрованою поверхнею в неізотермічній течії, а також пов'язаних із цими процесами змін інтенсивності тепловіддачі.

### Метод розв'язання

Задача течії рідини на початковій ділянці труби з частковим гофруванням поверхні при перехідному режимі розв'язувалась у двовимірній осесиметричній постановці. Проводилось пряме числове моделювання (DNS), в основу якого була покладена система нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса, нерозривності та енергії з урахуванням змінності коефіцієнта динамічної в'язкості рідини:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\ = \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \right. \\ \left. - \frac{\mu V_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\ = \frac{1}{\rho} \left( -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r V_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості крапельної рідини, представлений залежністю [9]:  $\mu = 2,791 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,885706 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,03231448$ .

Детальний опис методології проведення числового експерименту можна знайти в праці [2].

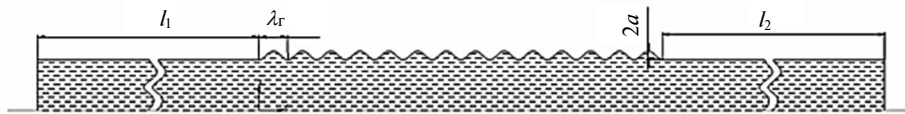


Рис. 1. Геометрія початкової ділянки труби з гофрованою вставкою

Досліджувався потік на початковій ділянці труби радіусом 35 мм і довжиною 3150 мм, що розділена на вхідну ділянку  $L_1/d = 21,5$ , гофровану незагромаджувальну вставку  $S/d = 4$  та вихідний патрубок  $L_2/d = 19,5$  (рис. 1).

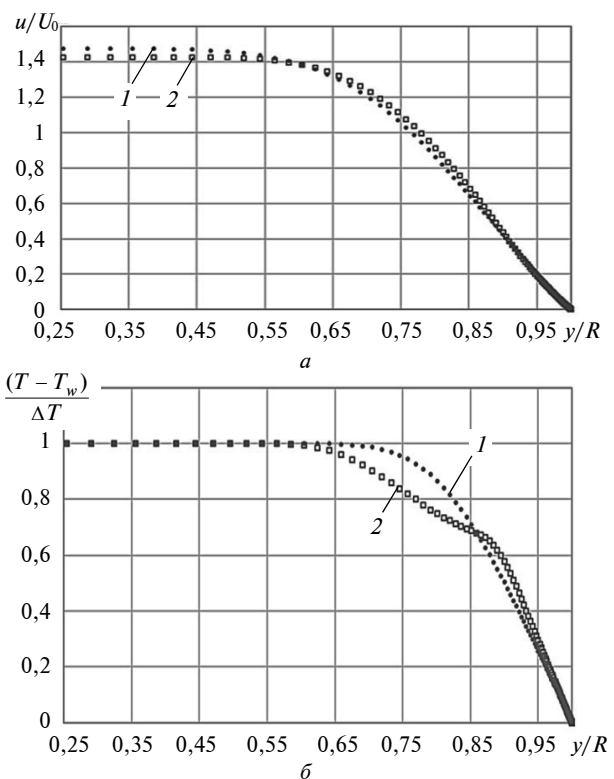
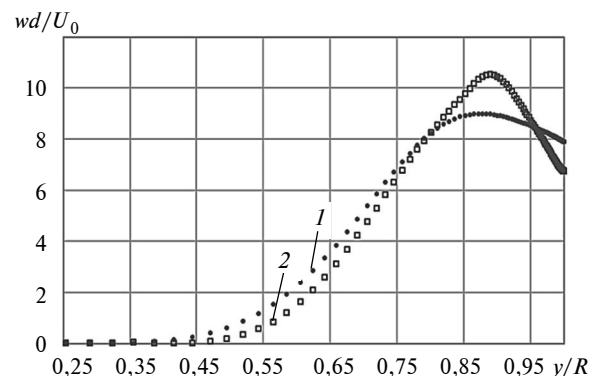
Розглядалося симетричне синусоїдальне гофрування з локальними радіусами, більшими за радіус гладкої частини труби (незагромаджувальне гофрування). Довжина хвилі гофра становила  $\lambda_r = 20$  мм, амплітуда  $a = 3$  мм.

Числовий експеримент проводився за сталого значення витрати теплоносія, яке відповідало числу Рейнольдса  $Re = 5300$ , встановленому за значенням в'язкості за температури поверхні труби  $T_w = 283$  К. Число Прандтля на стінці труби становило  $Pr_w = 9,52$ . Температура теплоносія по перерізу труби на вході була постійною, її значення задавалися з діапазону  $T_f = 308\text{--}333$  К, якому відповідали числа Прандтля  $Pr_f = 2,93\text{--}4,87$  і температурні напори  $\Delta T = 25\text{--}50^\circ$ .

### Результати моделювання

Числовий аналіз течії в трубі при ударному вході показав абсолютну стійкість профілю, що формується, протягом усієї початкової ділянки ( $L/d = 45$ ) до чисел Рейнольдса  $Re = 2000$  для всього діапазону розглянутих перепадів температур  $T = 0\text{--}50^\circ$ . Зі збільшенням числа Рейнольдса розвиток збурень у потоці та перехід до турбулентного режиму течії залежать від якості поверхні, інтенсивності початкових збурень, умов неізотермічності потоку. Залежно від градієнта температури для стисливих і нестисливих середовищ відбувається прискорення або уповільнення початку процесу генерації та розвитку збурень у примежовому шарі [10]. Наявність температурного чинника в коефіцієнті в'язкості спричиняє зміну профілю швидкості, а при негативному градієнті коефіцієнта в'язкості ( $Pr_f/Pr_w < 1$ ) на його профілі з'являється точка перегину всередині примежового шару (рис. 2, *a*), що приводить до якісної зміни розподілу завихреності по нормалі до поверхні (рис. 3) порівняно з розподілом завихреності в ізотермічному

потоці. У розглянутому діапазоні температурних напорів  $T = 25\text{--}50^\circ$  варіація точки перегину на профілі швидкості незначна, однак її наявність свідчить про виконання необхідних умов для втрати стійкості течії.

Рис. 2. Профіль швидкості (*a*) і температури (*b*) за різних температурних напорів і  $Re = 5300$ : 1 –  $\Delta T = 25^\circ$ ; 2 –  $\Delta T = 50^\circ$ Рис. 3. Завихреність за різних температурних напорів і  $Re = 5300$ : 1 –  $\Delta T = 25^\circ$ ; 2 –  $\Delta T = 50^\circ$

При цьому збільшення числа Прандтля теплоносія ( $Pr_f > 1$ ) призводить до зростання товщини динамічного прилежого шару і зменшення теплового прилежого шару (рис. 2, б).

У розглянутому діапазоні температур теплоносія відповідна зміна коефіцієнта динамічної в'язкості води і, відповідно, числа Прандтля приводить не тільки до істотної зміни гідравлічних втрат, але і до якісної зміни розвитку збурень вниз по потоку, що демонструє розподіл напружень тертя на стінці труби (рис. 4, а). У діапазоні значень температурного напору, відповідного числам Прандтля  $Pr_f > 4,5$ , у потоці як у гладкій трубі, так і в трубі з гофрованою вставкою за числа Рейнольдса  $Re = 5300$  не спостерігається кінцевих збурень. За числа Прандтля  $Pr_f \leq 4$  вплив градієнта в'язкості проявляється у вигляді появи гармонійних низькочастотних коливань (рис. 4, а) в кінці початкової ділянки. При подальшому зменшенні числа Прандтля теплоносія, що надходить, початок фіксованих пульсацій зміщується до входу труби, але фазова швидкість і довжина хвилі збурень практично не змінюються (рис. 5, а, б). Збурення, що виникають усередині прилежого 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, безрозмірені за товщиною прилежого шару та за місцевою максимальною швидкістю, відповідають класичним значенням хвилі Толлміна–Шліхтинга в прилежому шарі на пластині ( $\lambda/\delta = 6$ ;  $C_\phi = 0,45$ ). А оскільки товщина прилежого шару і, відповідно, максимальне значення швидкості на осі труби досить швидко збільшуються вниз за течією, то Фур'є-аналіз цих збурень демонструє багаточастотний дискретний спектр. При цьому треба відзначити, що початкові значення довжин хвиль і фазових швидкостей збурень, які фіксуються за однакового числа Рейнольдса, практично не залежать від температурного напору, однак область їх появи зміщується до входу труби при збільшенні температурного напору (рис. 5). При  $\Delta T = 50^\circ$  збурення, що поширюються, на початковій ділянці труби втрачають регулярність, різко зростають їх амплітуда і довжина хвилі, що свідчить про початок хаотизації процесу переходу; за менших значень температурного напору на розглянутій початковій ділянці хвильові збурення зберігають свою регулярність (рис. 5).

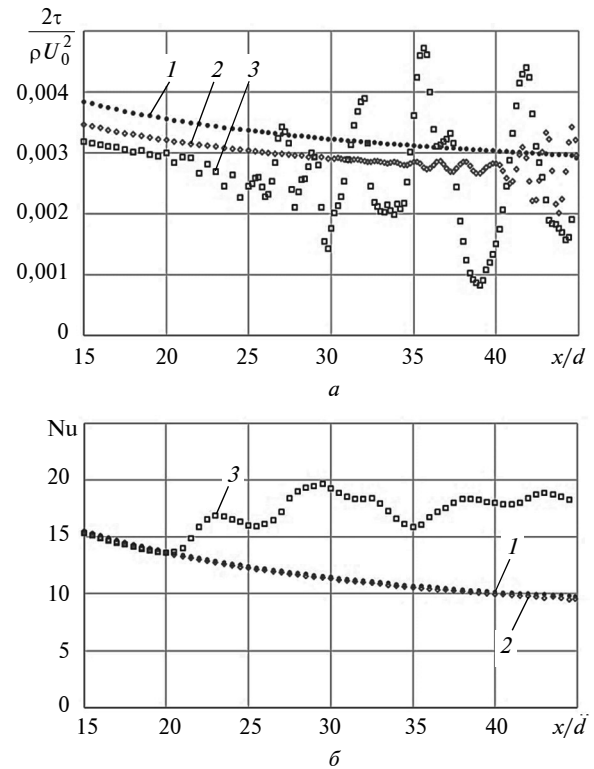


Рис. 4. Миттєві напруження тертя (а) і числа Нуссельта (б) у гладкій трубі за різних температурних напорів і  $Re = 5300$ : 1 –  $\Delta T = 25^\circ$ ; 2 –  $\Delta T = 37^\circ$ ; 3 –  $\Delta T = 50^\circ$

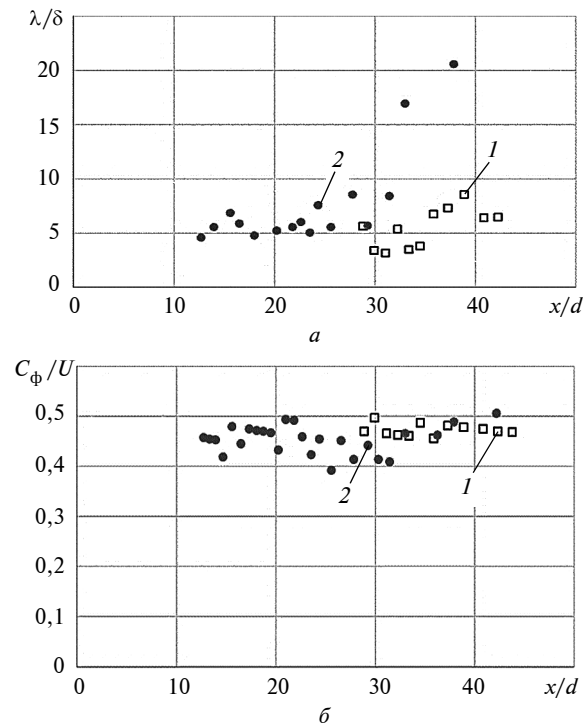


Рис. 5. Безрозмірні довжини хвиль (а) і фазові швидкості (б) виникаючих коливань за різних температурних напорів і  $Re = 5300$

Таким чином, 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  $Pr_f = 2,93$  початок генерації власних збурень у потоці відбувається до гофрованої вставки, а при  $Pr_f = 4,02$  початок виникнення власних збурень у гладкій трубі відповідав би середині гофрованої вставки. Однак при натіканні на довгохвильову гофровану поверхню амплітуди збурень малі й формування регулярної вихрової течії всередині перших заглиблень практично не залежить від температурного напору. Область гофрування характеризується значними коливаннями напруги тертя уздовж гофрованої поверхні від великих значень на гребнях гофрів, де товщина прилежого шару мінімальна, до негативних значень напруг усередині заглиблень, які свідчать про наявність стійкого вихрового утворення (рис. 6, а). Однак зі збільшенням температурного напору в наступних заглибленнях стійкість вихрової течії всередині заглиблень порушується з утворенням нестійкої багатовихрової системи, і гофрована поверхня стає джерелом збурень із довжинами хвиль  $\sim 2/3\lambda$ . При цьому треба врахувати, що було розглянуто тільки середньохвильове гофрування, яке виявилось істотно меншим довжини хвилі Толлміна–Шліхтинга.

Процес зростання збурень у трубі з гофрованою вставкою помітно відрізняється від зростання збурень у гладкій трубі. Збурення різняться як за амплітудою, так і за спектром, що обумовлено взаємодією власних збурень потоку і збурень, генерованих гофрованою вставкою.

Розвиток збурень зі збільшенням температурного напору  $\Delta T$  у прилежому шарі на поверхні гладкої труби визначає також і зміну густини теплового потоку порівняно з тепловим потоком при ламінарному режимі течії (див. рис. 4, б) залежно від величини температурного напору. При цьому 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. Теплообмін на гофрованій вставці, розміщеній або за точкою початку переходу, або перед потенційною точкою переходу, коли сама вставка стає генератором збурень, залежить насамперед від геометричних параметрів хвильової

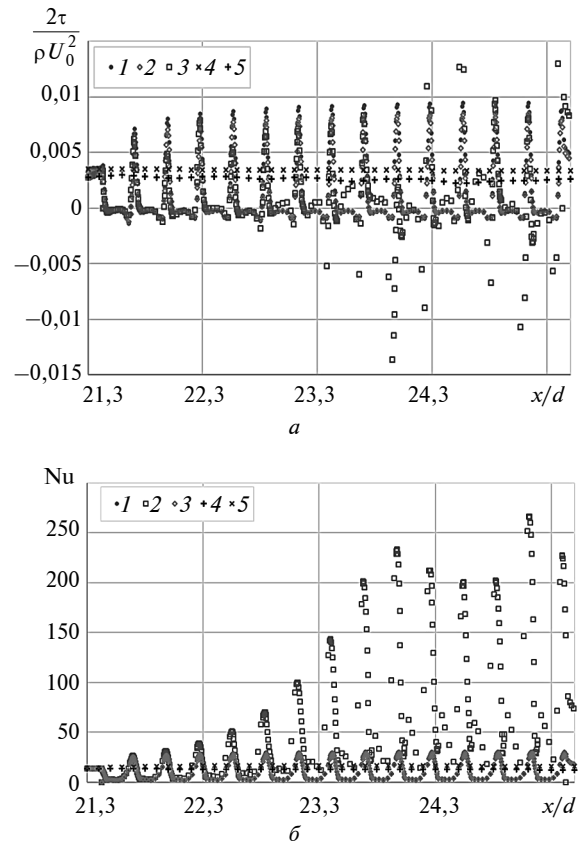


Рис. 6. Миттєві напруги тертя (а) і числа Нуссельта (б) в області гофрованої вставки за різних температурних напорів і  $Re = 5300$ : 1 –  $\Delta T = 25^\circ$ ; 2 –  $\Delta T = 37^\circ$ ; 3 –  $\Delta T = 50^\circ$ ; 4 – гладка труба,  $\Delta T = 25^\circ$ ; 5 – гладка труба,  $\Delta T = 50^\circ$

поверхні, числа Рейнольдса та величини температурного напору. За малих значень температурного напору  $\Delta T < 37,5^\circ$  при  $Re = 5300$  густина теплового потоку визначається геометрією хвильової поверхні: на гребнях істотно підвищується, а в западинах – знижується. При цьому середнє значення інтенсивності теплообміну неістотно відрізняється від еквівалентної ділянки гладкої труби. І тільки при  $\Delta T = 50^\circ$  ми спостерігаємо різке зростання збурень не лише на гребнях, але й у западинах, у силу втрати стійкості регулярної вихрової течії в западинах гофра, що різко підвищує інтенсивність усередненого конвективного теплообміну порівняно з гладкою трубою (рис. 6, б).

Гофрована вставка збільшує величину теплообміну й у сліду за собою порівняно з величиною теплообміну в гладкій трубі. Протяжність цієї зони залежить від ступеня збуреності течії, що визначається величиною температурного напору (числом Прандтля теплоносія) та геометричними параметрами поверхні (рис. 7).

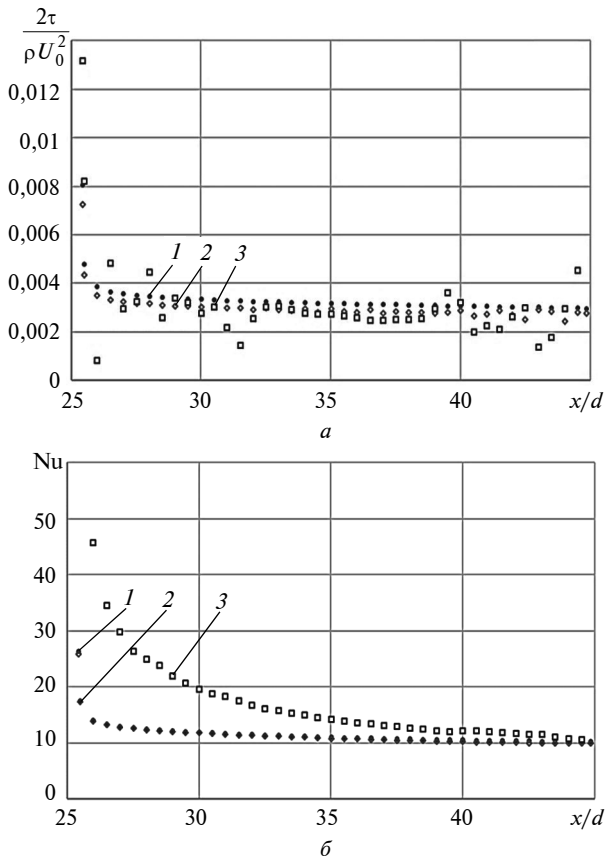


Рис. 7. Миттєві напруги тертя (*a*) і числа Нуссельта (*b*) в області після гофрованої вставки за різних температурних напорів і  $Re = 5300$ : 1 –  $\Delta T = 25^\circ$ ; 2 –  $\Delta T = 37^\circ$ ; 3 –  $\Delta T = 50^\circ$

Так, за температурного напору до  $\Delta T = 37,5^\circ$  спостерігається невелика, що не перевищує довжину вставки, зона підвищеного теплообміну, зумовлена меншими значеннями товщини прилежого шару в сліду за гофрованою вставкою. Зі збільшенням температурного напору ця зона збільшується в розмірах за рахунок наростання низькочастотної збуреності в потоці (що можна бачити на прикладі осциляцій значення напруги тертя (рис. 7, *a*)), коли зона початку переходу наближається до гофрованої вставки.

Однак при температурному напорі в  $50^\circ$ , коли початок переходу знаходиться перед гофрованою вставкою і відбувається взаємодія власних збурень прилежого шару з вихровими збуреннями менших масштабів, що генеруються гофрованою поверхнею, інтенсивність теплообміну збільшується порівняно з незбуреним ламінарним потоком, але дещо поступається інтенсивності теплообміну на цій ділянці гладкої

труби при природньому розвитку збурень у силу втрати стійкості.

### Висновки

Результати розрахунків показали, що зменшення співвідношення чисел Прандтля  $Pr_f/Pr_w$  при перехідних числах Рейнольдса призводить до суттєвої дестабілізації ламінарної течії в трубі на її початковій ділянці за рахунок появи власних низькочастотних збурень кінцевої амплітуди, що спричиняє істотне збільшення інтенсивності теплообміну за рахунок прояву вихрового руху.

Гофрована вставка з певною довжиною хвилі гофра, розміщена до початку природнього переходу, генерує у потоці збурення, пропорційні довжинам хвиль гофра. Це може, за малих довжин хвиль гофра, змінити не тільки швидкість росту збурень у потоці, але й привести до його регуляризації та навіть до ламінаризації потоку на обмеженій ділянці труби, а завдяки детермінізації масштабів вихрових утворень приводить до нехтовно малого зростання гідравлічного опору.

Ефект впливу гофрованої вставки, розміщеної нижче за течією від початку переходу, на власні збурення течії в трубі залежить не тільки від довжин хвиль гофра, але й від відстані вставки від початку переходу, тому що зі збільшенням відстані збільшуються довжини хвиль власних збурень та їх амплітуда. Таким чином, чим більший температурний напір за фіксованого числа Рейнольдса та чим далі розміщується гофрована вставка від початку переходу, тим більшими повинні бути довжина й амплітуда хвилі гофра.

Разом із тим на початкових ділянках  $L/d < 45$  при  $Pr_f/Pr_w > 1/2$  зміною тепловіддачі та гідравлічними втратами, порівняно з гладкою трубою, можна знехтувати аж до чисел Рейнольдса 5300.

При подальшому дослідженні впливу температурного фактора на процеси переходу в гофрованих трубах необхідно розглянути інші форми та параметри гофрування з урахуванням залежності початку переходу від температурного напору за фіксованого числа Рейнольдса. Отримані результати можуть бути застосовані при проектуванні компактних енергоефективних теплообмінних апаратів.

## References

- [1] A.G. Laptev *et al.*, *Efficiency of Transport Phenomena in Channels with Chaotic Packing Layers*. SPb, Russia: Kazn', 2016.
- [2] A.A. Baskova and G.A. Voropaev, "Structure of the vortex nonisothermal flow at the initial section of the pipe with transition Reynolds numbers", *Gidrodinamika i Akustika*, no. 1, pp. 117–131, 2018. doi: 10.15407/jha2018.02.117
- [3] R. L. Webb *et al.*, "Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 14, no. 4, pp. 601–617, 1971. doi: 10.1016/0017-9310(71)90009-3
- [4] D.F. Dipprey and R.W. Sabersky, "Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various Prandtl numbers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 6, no. 5, pp. 329–353, 1963. doi: 10.1016/0017-9310(63)90097-8
- [5] A.M. Guzmán *et al.*, "Heat transfer enhancement by flow bifurcations in asymmetric wavy wall channels", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 52, no. 15–16, pp. 3778–3789, 2009. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.026
- [6] A. Yılmaz, "Optimum length of tubes for heat transfer in turbulent flow at constant wall temperature", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 51, no. 13–14, pp. 3478–3485, 2008. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.034
- [7] P.G. Vicente *et al.*, "Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, no. 4, pp. 671–681, 2004. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.005
- [8] S. Rainieri and G. Pagliarini, "Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 45, no. 22, pp. 4525–4536, 2002. doi: 10.1016/S0017-9310(02)00156-4
- [9] S.L. Rivkin and A.A. Aleksandrov, *Thermodynamic properties of water and steam*, 2nd ed. Moscow, SU: Energoatomizdat, 1984.
- [10] M. Gad-el-Hak *et al.*, "Transition control", in *Instability and Transition*, vol. 1, M.Y. Hussaini, R.G. Voigt, eds. New York: Springer, 1990, pp. 319–354. doi: 10.1007/978-1-4612-3430-2\_38

Г.А. Воропаев, А.А. Баскова

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТРУБЫ

**Проблематика.** Повышение энергоэффективности теплообменных аппаратов возможно путем развития поверхности теплообмена и изменения режима течения с целью уменьшения гидравлических потерь. Процессы перехода из ламинарного в турбулентный режим, равно как и из турбулентного в ламинарный, зависят от большого количества факторов, в том числе от температурного, влияющего на вязкость потока и, соответственно, на число Прандтля. Еще одной особенностью переходного режима течения является резкий характер изменения в интенсивности теплообмена даже при небольших изменениях в числе Рейнольдса, что создает определенные трудности в работе с ним.

**Цель исследования.** Изучить процессы потери устойчивости и перехода к турбулентному режиму на начальном участке трубы с частично развитой поверхностью. Определить влияние температурного фактора на взаимосвязь гидравлических и тепловых параметров потока.

**Методика реализации.** Численный эксперимент с применением метода прямого численного моделирования (DNS) средствами программного обеспечения Ansys Fluent.

**Результаты исследования.** Определены пороговые значения температурного напора, при которых поток в трубе данной длины, при заданном числе Рейнольдса, теряет устойчивость. Определены зависимости временных и пространственных масштабов возникающих возмущений и скорости их роста в зависимости от сочетания числа Рейнольдса и температурного напора. Показана взаимосвязь значений напряжения трения с величинами теплового потока. Получены динамические и тепловые характеристики потока в области гофрированной поверхности, на основании которых определены пороговые значения температурного напора, при которых частичное гофрирование является энергоэффективным.

**Выводы.** Рост температурного напора приводит к более ранней генерации и интенсификации вихревого движения, обуславливающего рост конвективного теплообмена при фиксированном числе Рейнольдса. Размещение гофрированной вставки по отношению к месту зарождения конечных возмущений, наряду с геометрией гофрирования, существенно изменяет динамические и тепловые характеристики потока.

**Ключевые слова:** течение в трубе; устойчивость потока; интенсификация теплообмена; гофрирование; начальный участок трубы; температурный напор; число Прандтля.

G.A. Voropaev, O.O. Baskova

### TEMPERATURE FACTOR EFFECT ON THE FLOW STABILITY LOSS IN THE PIPE INITIAL SECTION

**Background.** Improving the energy efficiency of heat exchangers is possible by developing the heat exchange surface and changing the flow regime in order to reduce hydraulic losses. The processes of transition from laminar to turbulent regime, exactly as from turbulent to laminar, depend on a large number of factors, including temperature, that affecting the viscosity of the flow and, respectively, the Prandtl number. Another feature of the transitional flow regime is the sharp nature of the change in the heat exchange intensity even with small changes in the Reynolds number, which creates certain difficulties in working with it.

**Objective.** The purpose of the paper is: studying the processes of stability loss and transition to the turbulent regime in the initial section of the pipe with a partially developed surface; determining the influence of the temperature factor on the relationship of hydraulic and thermal flow parameters.

**Methods.** Numerical experiment using direct numerical simulation (DNS) and instruments of the Ansys Fluent software.

**Results.** The threshold values of the temperature gradient at which the flow in a pipe of a given length, for a given Reynolds number loses stability, are determined. The dependences of the temporal and spatial scales of arising disturbances and their growth rates from the combination of the Reynolds number and temperature gradient are determined. The interrelation of wall shear stress values with heat flux values is shown. Dynamic and thermal characteristics of the flow in the area of the corrugated surface were obtained, on the basis of which the threshold values of the temperature gradient at which the partial corrugation is energy efficient are determined.

**Conclusions.** An increase in temperature gradient leads to an earlier generation and intensification of the vortex motion, which causes an increase in convective heat transfer at the fixed Reynolds number. The location of the corrugated insert in relation to the place of the finite perturbations genesis, along with the geometry of the corrugation, significantly changes the dynamic and thermal characteristics of the flow.

**Keywords:** flow in the pipe; flow stability; heat transfer intensification; corrugation; initial section of the pipe; temperature gradient, Prandtl number.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
26 квітня 2019 року

Прийнята до публікації  
20 червня 2019 року