

**Г. О. ВОРОПАЄВ, Н. В. РОЗУМНЮК, О. О. БАСКОВА**

### **ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТЕЧІЇ У ПРЯМОКУТНІЙ ТРАНШЕЇ**

Дослідження особливостей структури потоку в прямокутних траншеях в широкому діапазоні чисел Рейнольдса проводилося шляхом прямого чисельного моделювання течії в каналі та на пластині. Розглядалася як ізотермічна, так і неізотермічна постановка задачі. В якості досліджуваної рідини використовувалися вода та повітря. Структура течії всередині та в околі траншеї в прямокутному каналі в діапазоні чисел Рейнольдса за довжиною траншеї  $Re_w \leq 9000$  досліджувалася в тривимірній постановці. В діапазоні чисел Рейнольдса  $Re_w > 10000$  розглядалось нестационарне обтікання пластини із траншеєю у двовимірній постановці задачі. В залежності від числа Рейнольдса, проаналізовано структуру потоку в траншеї, вплив геометричних параметрів на масштаби вихорів в траншеї, їх локалізацію та інтенсивність. Одержано масштаби неоднорідності течії в траншеї в поперечному напрямку. Розглянуто особливості нестационарної поведінки та взаємодії вихрових утворень між собою та із зовнішнім потоком при більших числах Рейнольдса, показано розвиток нестійкості вихрової структури в траншеї та її вплив на характеристики зовнішнього потоку: від регулярних коливань з певною частотою до поступової хаотизації потоку в околі траншеї при збільшенні числа Рейнольдса, з появою дрібних та кратних частот. Проведено порівняння із вихровою структурою, отриманою іншими дослідниками при схожих геометричних параметрах траншеї. Розглянуто вклад опору тертя та опору форми в загальний гідравлічний опір траншеї, а також обтічної поверхні нижче траншеї. Оцінено інтенсивність теплообмінних процесів всередині траншеї, локалізацію максимальних значень теплових потоків, залежність тепловіддачі від швидкості набігаючого потоку.

**Ключові слова:** прямокутна траншея, структура вихрової течії, число Рейнольдса, пряме чисельне моделювання, неізотермічна течія, нестационарне обтікання пластини.

**Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. В. РОЗУМНЮК, А. А. БАСКОВА**

### **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРАНШЕЕ**

Исследование особенностей структуры потока в прямоугольных траншеях в широком диапазоне чисел Рейнольдса проводилось путем прямого численного моделирования течения в канале и на пластине. Рассматривалась как изотермическая, так и неізотермическая постановка задачи. В качестве исследуемой жидкости использовались вода и воздух. Структура течения внутри и в окрестностях траншеи в прямоугольном канале в диапазоне чисел Рейнольдса по длине траншеи  $Re_w \leq 9000$  исследовалась в трехмерной постановке. В диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_w > 10000$  рассматривалось нестационарное обтекание пластины с траншеей в двухмерной постановке задачи. В зависимости от числа Рейнольдса, проанализирована структура потока в траншее, влияние геометрических параметров на масштабы вихрей в траншее, их локализацию и интенсивность. Получены масштабы неоднородности течения в траншее в поперечном направлении. Рассмотрены особенности нестационарного поведения и взаимодействия вихревых образований между собой и с внешним потоком при больших числах Рейнольдса, показано развитие неустойчивости вихревой структуры в траншее и ее влияние на характеристики внешнего потока: от регулярных колебаний с определенной частотой до постепенной хаотизации потока в окрестности траншеи при увеличении числа Рейнольдса, с появлением мелких и кратных частот. Произведено сравнение с вихревой структурой, полученной другими исследователями при схожих геометрических параметрах траншеи. Рассмотрены вклады сопротивления трения и сопротивления формы в общее гидравлическое сопротивление траншеи, а также обтекаемой поверхности за траншеей. Оценена интенсивность теплообменных процессов внутри траншеи, локализация максимальных значений тепловых потоков, зависимость теплоотдачи от скорости набегающего потока.

**Ключевые слова:** прямоугольная траншея, структура вихревого течения, число Рейнольдса, прямое численное моделирование, неізотермическое течение, нестационарное обтекание пластины.

**G. O. VOROPAIEV, N. V. ROZUMNYUK, O. O. BASKOVA**

### **FEATURES OF THE FLOW STRUCTURE IN A RECTANGULAR TRENCH**

The study of features of the flow structure in rectangular trenches in a wide range of Reynolds numbers was carried out by means of direct numerical simulation of the flow in the channel and on a plate. Both isothermal and non-isothermal formulations of the problem were considered. Water and air were used as the investigated fluids. The flow structure inside and around the trench in the rectangular channel in the range of Reynolds numbers based on the trench length  $Re_w \leq 9000$  was studied in a three-dimensional setting. In the Reynolds numbers range  $Re_w > 10000$ , unsteady flow around a plate with a trench was considered in two-dimensional formulation of the problem. Depending on the Reynolds number, the flow structure in the trench, the influence of geometric parameters on the vortices scales in the trench, their localization and intensity were analyzed. The scale of inhomogeneity of the trench flow in the transverse direction was obtained. The features of non-stationary behavior and interaction of vortex formations with each other and with the external flow at higher Reynolds numbers are considered, development of instability of the vortex structure in the trench and its influence on characteristics of the external flow are shown: from regular oscillations at certain frequency to gradual chaosization of the flow around the trench as the Reynolds number increases, when fractional and multiple frequencies appear. A comparison was made with the vortex structure obtained by other researchers for similar geometric parameters of the trench. The contributions of frictional drag and shape drag to the overall hydraulic drag of the trench, as well as the streamlined surface downstream the trench, are considered. Intensity of heat exchange processes inside the trench, localization of the maximum values of heat fluxes, dependence of heat transfer on the oncoming flow speed were evaluated.

**Key words:** rectangular trench, eddy flow structure, Reynolds number, direct numerical simulation, non-isothermal flow, unsteady flow around a plate.

**Вступ.** Рельєф з прямокутними виступами та/або западинами є характерним для поверхонь багатьох пристроїв та деталей обладнання. Наявність таких перешкод природним чином впливає на *теплогідродинамічні характеристики об'єктів*, змінює не тільки опір тиску таких поверхонь, але і опір тертя і інтенсифікує *теплообмін* в сліді за перешкодами [1, 2]. Вплив виступів на обтічних поверхнях на опір суттєво більший, ніж вплив поглиблень з тих же відносних *геометричних параметрів* [3, 4], але вони майже однаково впливають на теплообмін. При цьому було відзначено різний *вплив геометрії заглиблень* в плані на опір та *структуру вихрової течії* в сліді, від якої залежить ступінь інтенсифікації теплообміну при деякому збільшенні *гідравлічних витрат* [5]. Дані

© Г. О. Воропаєв, Н. В. Розумнюк, О. О. Баскова, 2023

ефекти обумовлені масштабами *вихрової структури потоку*, яку генерує заглиблення, в сліді за собою. При цьому характерним масштабом вихрової структури є *глибина поглиблення* ( $h$ ) при відношенні  $0,2 < h/w < 1$  [6, 10, 11]. Однак, простежувати і висувати гіпотези щодо еволюції вихрових структур, генерованих заглибленнями складної геометрії в плані, є передчасним, оскільки навіть в прямокутній траншеї вихрова структура, що виникає, істотним чином залежить як від *числа Рейнольдса*, геометричних параметрів лунки, так і від динамічних параметрів натікаючого примежового шару. І тим більше у випадках багаторядного розташування поглиблень.

**Аналіз попередніх досліджень.** Дослідження відриву *примежового шару* і структури течії в траншеї довгий час проводилися виключно в двовимірній постановці, що було обумовлено обмеженими можливостями ЕОМ. Створення комп'ютерів з великими об'ємами пам'яті і високошвидкісними процесорами дозволили збільшити якість сіток, що позитивно позначилося на точності інформації, що отримується в ході моделювання, а також дозволило перейти до розв'язання *тривимірних задач*, нехай і в обмеженому діапазоні чисел Рейнольдса. Так, у роботі [7] наведені результати *тривимірного прямого чисельного моделювання*, при числі Рейнольдса  $Re_\tau = 400$ , в каналі з регулярною шорсткістю у вигляді прямокутних виступів, що утворюють мілкі поперечні траншеї  $h/l = 0,125$ . Автори відзначили рівний внесок як опору форми, так і напруження тертя в загальний опір. При цьому було помічено суттєве превалювання локальних «*турбулентних*» *напружень Рейнольдса* над напруженням тертя за перешкодами, що підтверджує суттєвий тривимірний характер збуреної течії. Дане дослідження показує необхідність більш детального вивчення течії в траншеї.

Автори [8] досліджували *осциляції* у потоці, що виникають при різних співвідношеннях глибини траншеї до її ширини. Було виявлено збільшення довжини хвилі осциляцій із наближенням форми траншеї до прямокутної. Одночасно з цим було показано зміну вихрової структури траншеї з витягуванням одного з вихрових утворень у напрямку потоку при збереженні локалізації його центру біля навітряної стінки. Результати досліджень, наведені в [8], показали, що в цьому випадку нестійкість вихрового руху виникає через відцентрову нестійкість вихору за уступом. Даний механізм виникнення нестійкості подібний до механізму генерації збурень при течії в каналі зі сходиною [9].

Дослідження авторів [10] було присвячено *опору траншеї*, зокрема впливу на його величину геометричних параметрів поглиблення. Збільшення ширини призводило до зростання коефіцієнта опору  $i$ , загалом, мало більший вплив на його величину, ніж збільшення швидкості. У цій же роботі детально описано зміну структури течії від стаціонарного вихрового утворення всередині квадратного поглиблення до складної вихрової структури при наближенні форми перерізу каверни до прямокутної.

**Постановка задачі.** Метою даного дослідження є вивчення структури вихрової течії в траншеї (рис. 1) в *ізо термічних та неізо термічних умовах*. Параметри каналу в тривимірній постановці:  $L1/L = 0,26$ ,  $h/H = 0,075$ ,  $L2/L = 0,26$ ,  $w/h = 3$ . В двовимірній постановці:  $w = 40$  мм,  $h = 20$  мм,  $w/h = 2$ ,  $L1/L = 0,38$ .

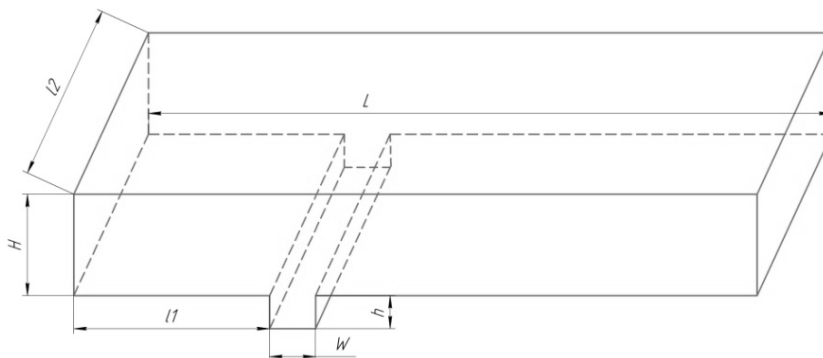


Рис. 1 – Геометрія каналу з траншеєю.

В тривимірній постановці на вході в канал задавалася постійна швидкість з діапазону чисел Рейнольдса  $Re = 20000 \dots 40000$ , розрахованого по гідравлічному діаметру каналу, при визначальній температурі, що відповідає температурі на стінці. Число Рейнольдса, розраховане по довжині траншеї вздовж потоку ( $w$ ) не перевищувало  $Re_w \approx 7500$ . Температура теплоносія на вході в канал  $T_f = 333$  К. На стінках каналу задавалися умови прилипання та постійна температура  $T_w = 283$  К. На виході з каналу задавалися м'які граничні умови типу *Outflow*.

В двовимірній постановці верхня границя розрахункової області моделювала вільний потік із заданою швидкістю в діапазоні  $Re = 12000 \div 20000$  і була віднесена від обтічної поверхні на відстань  $H/h = 7.5$ . Вплив градієнту температури не вивчався. Граничні умови на інших границях були такими ж, як в тривимірному випадку.

Для розв'язання поставленої задачі було побудовано дві сітки розбиття тривимірної розрахункової області,

відмінність яких полягала в наявності згущення в траншеї (рис. 2). Кількість комірок становила 4,3 млн. для сітки без згущення і 6 млн. для сітки зі згущенням. Результати, отримані з використанням даних сіток, за тих самих початкових і граничних умов, виявилися практично ідентичними.

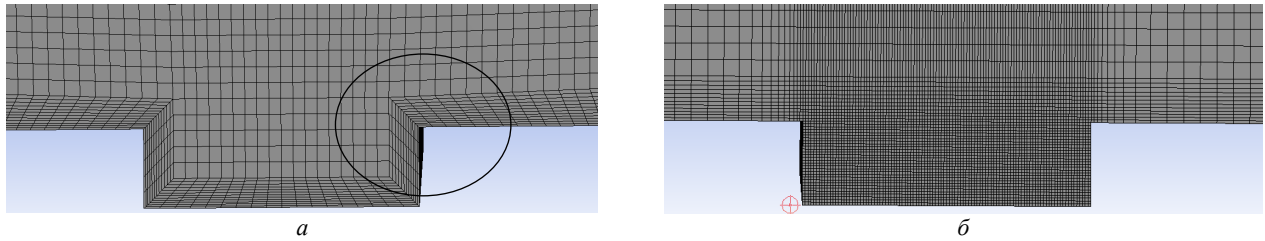


Рис. 2 – Сітки розбиття тривимірної розрахункової області: *a* – 4,3 млн. комірок; *б* – 6 млн. комірок.

В двовимірному випадку розрахункова сітка складалася з приблизно 225 тис. комірок, всередині траншеї було 30 тис. комірок, пристінний крок біля її стінок, а також біля обтічної поверхні дорівнював 0.1 мм. В районі траншеї формувався примежовий шар, товщина якого відповідала товщині ламінарного примежового шару при відповідному місцевому числі Рейнольдса ( $Re_x = 1.1 \cdot 10^5 \div 1.7 \cdot 10^5$ ) за формулою  $\delta = 5x / Re_{x^{1/2}}$ .

**Математична модель.** Дослідження структури течії в каналі з траншеєю проводилося з використанням методу прямого чисельного моделювання (DNS) системи рівнянь, що складається з:

– рівняння руху Нав'є – Стокса:

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

де  $i, j = 1 \dots 3$ ;  $\rho$  – густина середовища;

– рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0;$$

– рівняння енергії:

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

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $c_p$  – теплоємність;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, представлений поліноміальною функцією:

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

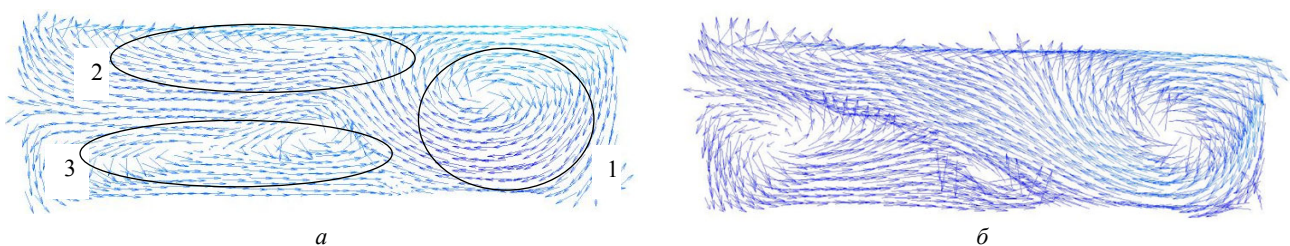


Рис. 3 – Векторна візуалізація течії всередині траншеї при: *a* –  $Re = 25000$ ; *б* –  $Re = 40000$ .

Особливості використаної математичної моделі:

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

**Результати чисельного моделювання.** Проведене тривимірне чисельне моделювання течії в каналі з траншеєю із співвідношенням довжини траншеї до її висоти  $w/h = 3$  в діапазоні чисел Рейнольдса  $Re = 25000 \div 40000$  показало, що всередині траншеї при зміні чисел Рейнольдса формується як класична непарна система вихорів (рис. 3, *a*,  $Re = 25000$ ), так і структура течії, в якій вихори **1** та **2** об'єднуються (рис. 3, *б*,  $Re =$

= 40000).

Найбільш інтенсивним і стійким є *вихор 1* (рис. 3, *a*), який акумулює на себе енергію потоку та перерозподіляє її між іншими вихорами. При збільшенні числа Рейнольдса спостерігається зростання завихреності, інтенсифікується перерозподіл потоків мас і енергій, причиною якого може бути як збільшення числа Рейнольдса, так і градієнт в'язкості, обумовлений різницею температур поверхні та рідини, що надходить в траншею, вплив якого більшою мірою проявляється при більш інтенсивному перемішуванні. Аналогічний вигляд вихрової течії в траншеї як системи, що складається з двох вихрових утворень, наведено в [8].

На навітряній стінці траншеї спостерігається неоднорідне як по глибині, так і по розмаху поле тиску (рис. 4). Максимальне значення тиску досягається в області кромки, де потік ударяється об стінку. Зі зростанням швидкості неоднорідність тиску на навітряній стінці зростає, що характеризується довжиною поперечних хвиль збурень, але довжина хвилі збурень не зазнає істотних змін. Так, довжина хвилі при  $Re = 25000$  становить  $\lambda = 3,89$  мм, а при  $Re = 40000$  –  $\lambda = 3,68$  мм. Саме значення тиску майже визначає загальний опір траншеї, тому що величина напруження тертя на більшій частині поверхні траншеї є близькою до нуля (рис. 5, *a*), за виключенням кромки, де відбувається від'єднання зсувного шару (підвітряна стінка) та є мінімальною товщина прилежого шару (навітряна стінка).

На навітряній стінці траншеї та на дні траншеї спостерігаються від'ємні значення напруження тертя, що зменшує опір тертя та збільшує теплообмін. У цілому, отримані результати говорять про можливість досягнення мінімального гідравлічного опору при заданому способі збільшення площі теплообмінної поверхні.

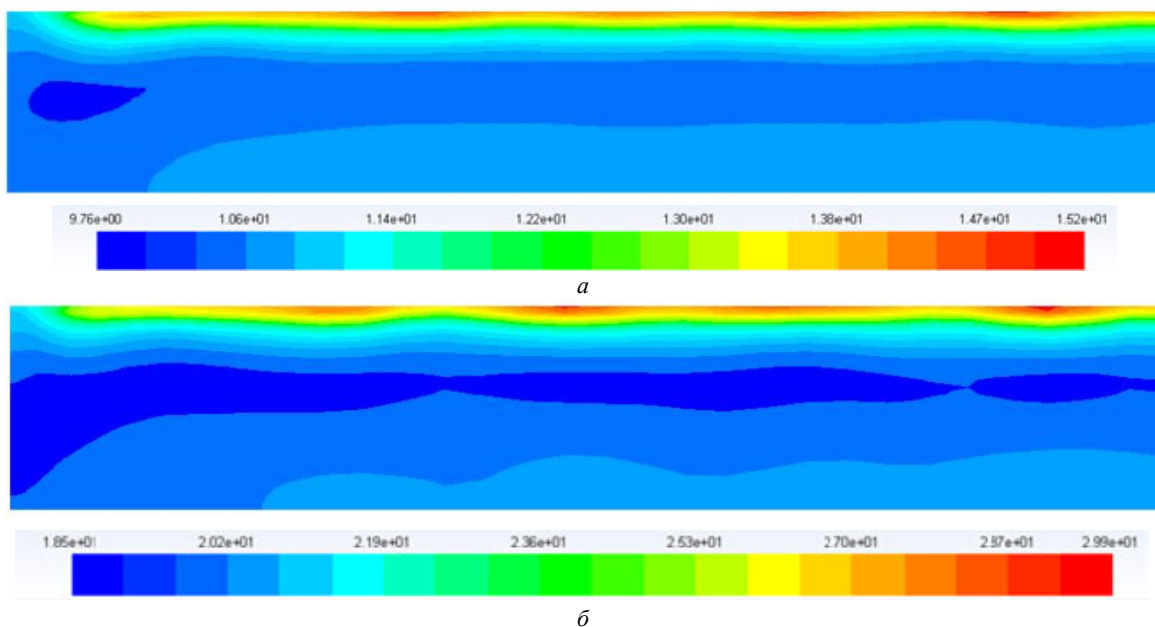


Рис. 4 – Поля тиску на частині навітряної стінки траншеї: *a* –  $Re = 25000$  ; *б* –  $Re = 40000$  .

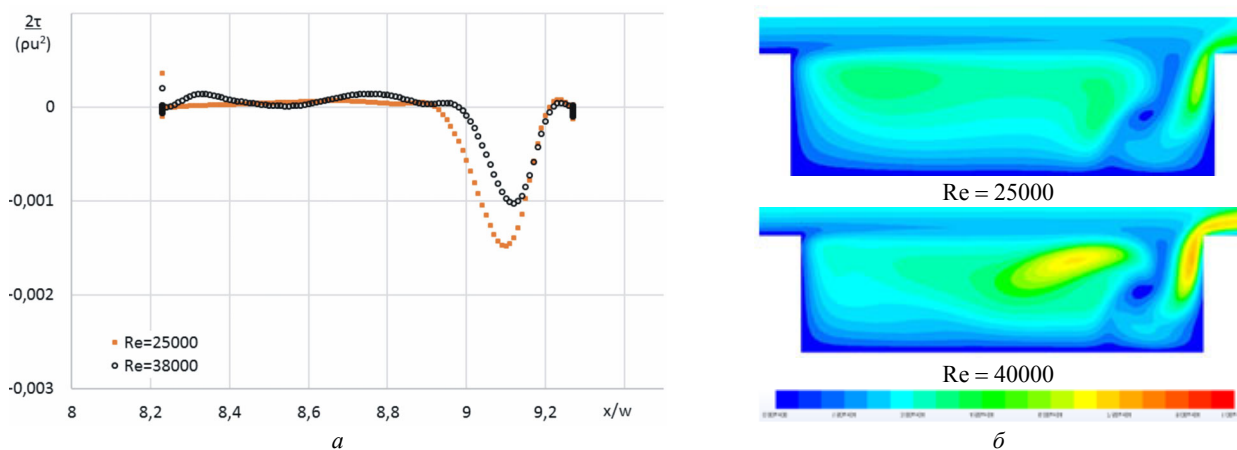


Рис. 5 – *a* – коефіцієнт тертя вздовж дна траншеї; *б* – та тепловий потік на боковій стінці траншеї.

Картина вихрового руху всередині двовимірної траншеї при більших числах Рейнольдса (рис. 6, а) подібна до тривимірного випадку, а також добре узгоджується з подібним дослідженням, виконаним в змінних завихреність – функція току з використанням іншого чисельного методу та сітки [11]. Біля навітряної стінки утворюється більш потужний *вихор 1* масштабом, співставним з висотою траншеї. Оскільки в даному випадку відношення довжини вздовж потоку до висоти траншеї  $w/h = 2$ , цей вихор займає приблизно половину довжини траншеї. За рахунок цього вихору в іншій половині розкручується і підтримується менш інтенсивний *вихор 3* зі зворотним напрямком обертання. Обидва вихори обертаються навколо своїх центрів, як твердотільні, тобто швидкість має лінійний розподіл вздовж діаметра. Максимальна відносна швидкість на діаметрі *вихору 1* дорівнює  $\approx 0.3U_\infty$ , і  $\approx 0.05U_\infty$  у *вихорі 3*. За цими максимумами на периферії вихорів швидкість зменшується, тому ядра вихорів мають периферію з протилежним знаком завихреності. Між вихорами і стінками траншеї потік направлений вздовж стінок до дна, за виключенням невеликих ділянок у верхніх частинах. В районі нижніх кутів траншеї формуються класичні кутові малоінтенсивні вихори (рис. 6, б). Ще один вторинний вихор можна бачити між основними вихорами біля дна траншеї. Швидкість у верхній частині *вихору 3* має протилежний напрямок відносно основного потоку. Тому між цим вихором і відірваним від лівого краю траншеї примежовим шаром утворюється витягнута *циркуляційна область – вихор 2*. Пульсації течії в траншеї викликають коливання зсувного шару над нею, які підсилюються, переміщуючись з потоком до правої стінки траншеї. При натиканні на правий край траншеї зсувного шару в його нижньому положенні він розрізається на дві частини: одна порція йде вниз, вздовж стінки траншеї, формуючи невеликі згустки з вищою закруткою на фоні *вихору 1*, а решта зноситься основним потоком, викликаючи помітні коливання параметрів потоку за траншеєю. У верхньому положенні зсувний шар проходить над краєм траншеї.

Колівання зсувного шару вздовж траншеї визначають домінуючу частоту, яка простежується і всередині траншеї, і в примежовому шарі за нею (рис. 7, а). Пронормоване за товщиною втрати імпульсу перед траншеєю та швидкістю основного потоку значення цієї частоти дорівнює  $f_\theta = 0,016$ , що відповідає результатам чисельного [11] та експериментального досліджень [12] при відповідному значенні відношення  $w/\theta$ .

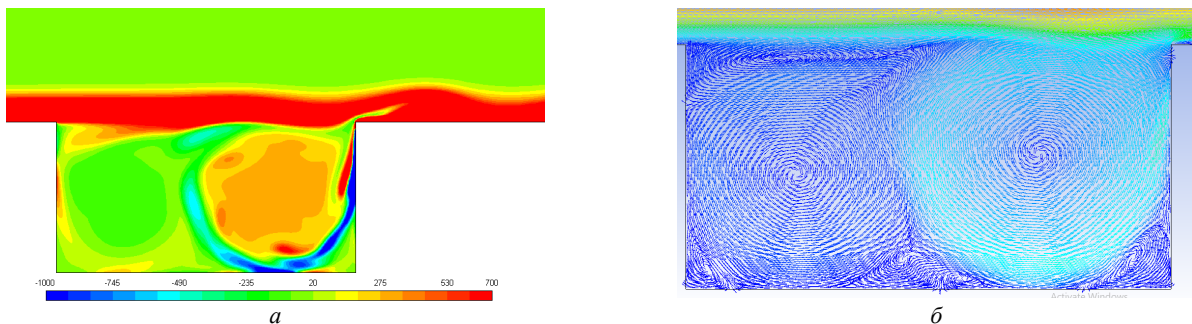


Рис. 6 – а – миттєві розподіл завихреності; б – поле безрозмірного вектора швидкості при  $Re_w = 13333$ .

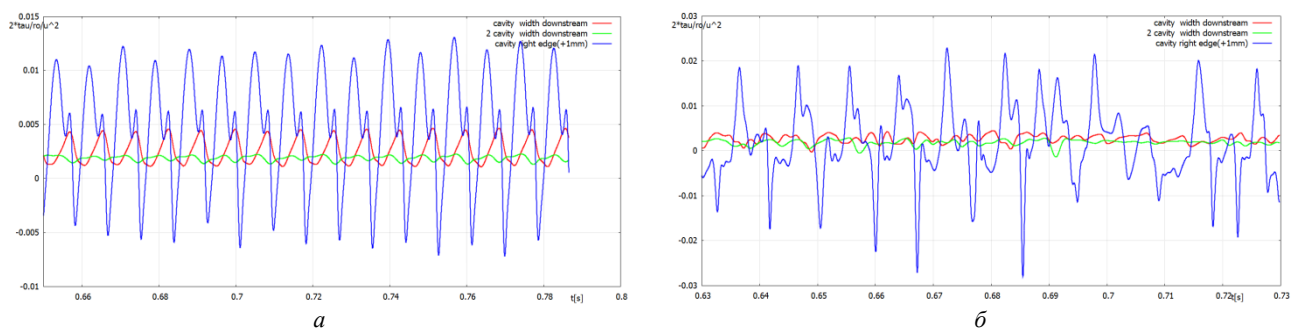


Рис. 7 – Коливання коефіцієнту тертя на обтічній поверхні біля правого краю траншеї та на відстані  $w$ ,  $2w$ :  
а – при  $Re_w = 13333$ ; б –  $Re_w = 20000$ .

При збільшенні числа Рейнольдса відбувається поступова хаотизація потоку в траншеї на фоні інтенсифікації основних і дрібномасштабних вихорів, утворених при розтіканні зсувного шару на правому краї траншеї. При  $Re_w = 20000$  максимальна швидкість у *вихорі 1* зростає до майже  $0.6U_\infty$ , ще більше підвищується швидкість у *вихорі 3* – до  $\approx 0.3U_\infty$ . За миттєвим полем безрозмірного вектора швидкості (рис. 8) можна бачити більшу амплітуду коливання зсувного шару на довжині траншеї ( $w$ ), що спотворює форму обох основних вихорів у їх верхніх частинах. В зсувному шарі над *вихором 3* спостерігається утворення і рух маленьких вторинних вихорів замість одного витягнутого *вихору 2*. Взаємодія дрібномасштабних утворень у зсувному шарі, а також на периферії основних вихорів, приводить до його розтягування та руйнування при наближенні до правого краю траншеї.



шеї, при цьому частина рідини викидається з траншеї в прилежний шар.

Амплітуди коливань всіх параметрів у прилежному шарі за траншеєю (рис. 7, б) суттєво збільшуються і втрачають регулярність, що відображається в появі у спектрах кратних та дрібних частот при зростанні відношення  $w/\theta$  (за рахунок зменшення  $\theta$ ). При цьому основна частота дорівнює  $f_\theta \approx 0,012$ , а на половинній частоті також спостерігається інтенсивний пік в околі траншеї, що можна пов'язати з частотою викидів рідини з траншеї. З віддаленням від траншеї спектри стають більш наповненими, відносна інтенсивність основних піків зменшується.

Що стосується опору траншеї, то його осереднена величина для нижчих чисел Рейнольдса є трохи меншою, ніж опір аналогічної ділянки гладкої пластини, і дещо перевищує опір даної ділянки при більшому числі Рейнольдса, але амплітуда коливань в кілька разів перевищує середні значення. Опір ділянки обтічної поверхні за траншеєю мало змінюється в часі і збільшується при  $Re_w = 20000$  до  $\sim 10\%$  порівняно з поверхнею без каверни.

Таким чином, при збільшенні числа Рейнольдса течія в траншеї втрачає стійкість, а її зміни у часі суттєво визначають поведінку потоку та частотні характеристики за траншеєю, а також величину гідродинамічного опору поверхні з траншеєю.

**Висновки.** На підставі прямого чисельного моделювання течії в каналі та на пластині з прямокутною траншеєю досліджено формування вихорів, масштаби та інтенсивність яких обумовлені швидкістю потоку і співвідношеннями геометричних параметрів траншеї відносно товщини натікаючого прилежного шару. В розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса в траншеї виникає система із непарною кількістю вихорів різної інтенсивності. При збільшенні числа Рейнольдса відбувається зростання інтенсивності цих вихорів та, у результаті перерозподілу енергії між ними, виникають певні нестійкості. В сліді за траншеєю прилежний шар набуває дискретних частот, генерованих траншеєю, число Струхаля яких залежить від числа Рейнольдса.

В розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса відносно неглибока траншея ( $h/w = 0.3$ ) на одиницю довжини каналу ( $L/w = 30$ ) збільшує гідравлічний опір до  $10\%$  у порівнянні з гладким каналом. В околі траншеї локальний теплообмін зростає до 6 разів, але інтегральні зміни теплового потоку в каналі не перевищують  $25\%$ . Отже траншея в даному діапазоні чисел Рейнольдса є відносно ефективним інтенсифікатором теплообміну з коефіцієнтом енергоефективності  $k = (Nu/Nu_0)/(Cf/Cf_0)^{0.5} = 1,19$ .

#### Список літератури

1. Fernando J. N., Kriegseis J., Rival D. E. Vortex Formation in Confined Rectangular-Cavity Flows // 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 24 – 27 June, 2013, San Diego, CA. <https://doi.org/10.2514/6.2013-3189>.
2. Barbagallo A., Sippi D., Jacqin L. Control of an Incompressible Cavity flow using a Reduced model based on Global modes // 5th AIAA Theoretical fluid mechanics conference. – 23 – 26 June, 2008, Seattle, Washington. <https://doi.org/10.2514/6.2008-3904>.
3. Войткунский Я. И. Сопротивление движению судов. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
4. Аносов В. Н. Влияние характеристик бортовых искусственных каверн на сопротивление движению быстроходных судов // Судостроение. – 2008. – № 3. – С. 23 – 26.
5. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях массовых сил: обзор работ, выполненных в ИТТФ НАН Украины. Часть 2. Поверхностно-вихревые системы (углубления) // Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34. – № 1. – С. 21 – 33.
6. Debiasi M. Experimental Exploration of Cavity Flow Physics. – Available at : <http://www.marcodebiasi.net>. Accessed : 20.03.2023.
7. Ashrafian Alireza, Andersson Helge, Manhart Michael. DNS of turbulent flow in a rod-roughened channel // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2008. – Т. 25. – № 3. – С. 373 – 383. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.02.004>.
8. Brès Guillaume, Colonius Tim. Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities // Journal of Fluid Mechanics. – 2008. – Т. 599. – С. 309 – 339. <https://doi.org/10.1017/S0022112007009925>.
9. Barkley D., Gomes G. M., Henderson R. D. Three-dimensional instability in flow over a backward-facing step // J. Fluid Mech. – 2002. – № 473. – С. 167 – 190. <http://dx.doi.org/10.1017/S002211200200232X>.
10. Белинский В. Г., Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Парамонов Ю. А. Экспериментальное исследование сопротивления и картины обтекания прямоугольных каверн в турбулентном потоке // Прикладна гідромеханіка. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 3 – 25.
11. Розумнюк Н. В. Мгновенные и осредненные характеристики вязкого потока около прямоугольной каверны // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Vol. 9(81). – № 4. – С. 49 – 58.
12. Lin J.-C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA Journal. – 2001. – Vol. 39. – № 6. – P. 1139 – 1151. <https://doi.org/10.2514/2.1427>.

#### References (transliterated)

1. Fernando J. N., Kriegseis J., Rival D. E. Vortex Formation in Confined Rectangular-Cavity Flows. 31st AIAA Applied Aerodynamics Conference. 24 – 27 June, 2013, San Diego, CA. <https://doi.org/10.2514/6.2013-3189>.
2. Barbagallo A., Sippi D., Jacqin L. Control of an Incompressible Cavity flow using a Reduced model based on Global modes. 5th AIAA Theoretical fluid mechanics conference. 23 – 26 June, 2008, Seattle, Washington. <https://doi.org/10.2514/6.2008-3904>.

3. Voytkunskiy Ya. I. *Soprotivlenie dvizheniyu sosudov* [Resistance to vessel motion]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 288 p.
4. Anosov V. N. Vliyanie kharakteristik bortovykh iskusstvennykh kavern na soprotivlenie dvizheniyu bystrokhodnykh sudov [The impact of the characteristics of the side artificial cavities on the high-speed vessel motion resistance]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. 2008, no. 3, pp. 23–26.
5. Khalatov A. A. Teploobmen i gidrodinamika v polyakh massovykh sil : obzor rabot, vypolnennykh v ITTF NAN Ukrainy. Chast' 2. Poverkhnostno-vikhrevye sistemy (uglubleniya) [Heat exchange and Hydrodynamics in the mass force fields : overview of the research carried out in the Institute of Engineering Thermodynamics of the National Academy of Science of Ukraine. Part 2. Surface vortex systems (cavities)]. *Prom. Teplotekhnika* [Industrial Thermal Mechanics]. 2012, vol. 34, no. 1, pp. 21–33.
6. Debiassi M. Experimental Exploration of Cavity Flow Physics. Available at : <http://www.marcodebiassi.net>. Accessed : 20.03.2023.
7. Ashrafian Alireza, Andersson Helge, Manhart Michael. DNS of turbulent flow in a rod-roughened channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2004, vol. 25, issue 3, pp. 373–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.02.004>.
8. Brès Guillaume, Colonius Tim. Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities. *Journal of Fluid Mechanics*. 2008, vol. 599, pp. 309–339. <https://doi.org/10.1017/S0022112007009925>.
9. Barkley D., Gomes G. M., Henderson R. D. Three-dimensional instability in flow over a backward-facing step. *J. Fluid Mech.* 2002, no. 473, pp. 167–190. <http://dx.doi.org/10.1017/S002211200200232X>.
10. Belinskiy V. G., Voropaev G. A., Voskoboynik A. V., Paramonov Yu. A. Yeksperimental'noe issledovanie soprotivleniya I kartiny obtekaniya pryamougol'nykh kavern v turbulentnom potoke [Experimental study of the resistance and the flow patterns around rectangular cavities in turbulent flow]. *Prykladna gidromekhanika* [Applied Hydrodynamics]. 2012, vol. 14, no. 4, pp. 3–25.
11. Rozumnyuk N. V. Mgnovenne I osrednyenne kharakteristiki vyzkogo potoka okolo pryamougol'noy kaverny [Instantaneous and average characteristics of viscous flow around rectangular cavity]. *Prikladnaya gidromekhanika* [Applied Hydrodynamics]. 2007, vol. 9(81), no. 4, pp. 49–58.
12. Lin J.-C., Rockwell D. Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity. *AIAA Journal*. 2001, vol. 39, no. 6, pp. 1139–1151. <https://doi.org/10.2514/2.1427>.

*Надійшла (received) 12.04.2023*

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Воропаєв Геннадій Олександрович** – доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (044) 371-65-17; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

**Воропаєв Геннадий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, Институт гидромеханики НАН Украины, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (044) 371-65-17; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

**Voropaiev Gennadii Aleksandrovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Hydromechanics National Academy of Sciences of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (044) 371-65-17; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

**Розумнюк Наталія В'ячеславівна** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-39; e-mail: nrozumnyuk@gmail.com.

**Розумнюк Наталия Вячеславовна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-39; e-mail: nrozumnyuk@gmail.com.

**Rozumnyuk Nataliya Vyacheslavivna** – PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow at the Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-39; e-mail: nrozumnyuk@gmail.com.

**Баскова Олександра Олександрівна** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (068) 198-93-75; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.

**Баскова Александра Александровна** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт гидромеханики НАН Украины, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; тел.: (068) 198-93-75; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.

**Baskova Oleksandra Oleksandrovna** – PhD of Technical Sciences, Researcher at the Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Assistant at the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv; tel.: (068) 198-93-75; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.