

11. Tranter C. J. *Integral Transforms in Mathematical Physics*. London, Methuen and Co. Ltd., NY, Wiley and Sons, Inc., 1951. 119 p.
12. Vorobiyenko P., Dmitrieva I. Comparative analysis in study of classical differential Maxwell system for the slow-guided structures. *Hyperion Intl. J. of Econophysics*. 2015, vol. 8, is. 2, pp. 333–348.
13. Dmitrieva I. Yu. Detailed explicit solution of the electrodynamic wave equations. *Odes'kyi Politechnichniy Universitet PRATSI*. 2015, is. 2 (46), pp. 145–154.
14. Caloz C., Itoh T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications. The Engineering Approach*. NJ, John Wiley and Sons Inc., 2006. 364 p.
15. Marques R., Martin F., Sorolla M. *Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications*. NJ, John Wiley and Sons Inc., 2008. 315 p.

Received (ноступила) 16.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Воробієнко Петро Петрович (Воробийенко Петр Петрович, Vorobiyenko Peter Petrovich) – доктор технічних наук, професор, ректор, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, м. Одеса; тел.: (050) 183-53-65; e-mail: vorobiyenko@onat.edu.ua.

Дмитрієва Ірина Юрївна (Дмитриева Ирина Юрьевна, Dmitrieva Irina Yuriyevna) – доктор технічних наук, доцент, зав. кафедрою вищої математики, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, м. Одеса; тел.: (066) 075-03-50; e-mail: dmitrievairina2017@gmail.com.

УДК 532.526;542

Г. А. ВОРОПАЕВ, А. А. БАСКОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА В ТРУБАХ СО СПИРАЛЬНЫМ ГОФРИРОВАНИЕМ

Проведено пряме численне моделювання неізотермічного течення на початкових ділянках гладкої труби і труби з гофрованими вставками різної геометрії при перехідних числах Рейнольдса. Проаналізовано виникнення та розвиток коливальних процесів в гладкій трубі і трубах з гофрованими вставками. Исследованы особенности структуры вихревого движения и изменения гидродинамических параметров в гофрированных вставках разной геометрии. Определена степень влияния угла наклона гофрирования к оси трубы на гидродинамические процессы в потоке в следе после гофрированной вставки.

Ключевые слова: течение в трубе, переходные числа Рейнольдса, вихревые возмущения, неізотермічний потік, пряме і витое гофрирование, частичне гофрирование.

Г. О. ВОРОПАЄВ, О. О. БАСКОВА

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕХОДУ В ТРУБАХ ІЗ СПИРАЛЬНИМ ГОФРУВАННЯМ

Проведено пряме численне моделювання неізотермічної течії на початкових ділянках гладкої труби і труби з гофрованими вставками різної геометрії при перехідних числах Рейнольдса. Проаналізовано виникнення та розвиток коливальних процесів в гладкій трубі і трубах з гофрованими вставками. Досліджені особливості структури вихрового руху та зміни гідродинамічних параметрів в гофрованих вставках різної геометрії. Визначено ступінь впливу кута нахилу гофрування до осі труби на гідродинамічні процеси в сліді після гофрованої вставки.

Ключові слова: течія в трубі, перехідні числа Рейнольдса, вихрові збурення, неізотермічний потік, пряме та витє гофрування, часткове гофрування.

Г. А. ВОРОПАЕВ, А. А. БАСКОВА

MODELING OF TRANSITION PROCESS IN TUBES WITH SPIRAL CORRUGATION

A direct numerical simulation of non-isothermal flow in the initial sections of a smooth pipe and a pipe with corrugated inserts of various geometry at transitional Reynolds numbers was carried out. The formation and development of a three-dimensional unsteady flow structure in a smooth tube and tubes with corrugated inserts were analyzed. The structure of the flow and the nature of changes in the hydrodynamic parameters inside the corrugated insert were investigated. The influence of corrugation geometry on the flow mixing and the nature of hydrodynamic parameters distribution in the flow after the corrugated insert were analyzed. An increase in hydraulic losses of up to 9% in tubes with corrugated inserts compared to a smooth tube was observed and its dependence on the geometry of corrugation was studied.

Key words: flow in a tube, transitional Reynolds numbers, vortex disturbances, non-isothermal flow, straight and spiral corrugation, partial corrugation.

Введение. Общеизвестно, что термогидравлические характеристики внутренних течений при *переходных числах Рейнольдса* определяются *режимом течения (ламинарный или турбулентный)*, формирующимся в устройствах в зависимости от условий на входе, качества и вида геометрии поверхности, а также изменяемости физических параметров текущей среды. В протяженных устройствах при изменении проходных сечений режим течения может непредсказуемо меняться, что приводит к резкому изменению термо-гидравлических характеристик теплообменных устройств.

Вместе с тем, теоретический классический анализ течения в трубах постоянного диаметра не дает пороговых чисел Рейнольдса потери устойчивости течения, в отличие от устойчивости пограничных слоев, где теоретический линейный анализ потери устойчивости качественно и количественно подтверждается экспериментом.

© Г. А. Воропаев, А. А. Баскова, 2019

Возникновение волновых возмущений в стационарных ламинарных безотрывных потоках происходит или может происходить вследствие развития бесконечно малых возмущений, которые всегда существуют в потоке. Процесс их развития и трансформация в регулярные или хаотичные вихревые системы может происходить по разным сценариям, которые определяются сочетанием параметров потока и их величиной [1, 2]. На начальном участке, когда толщина пограничного слоя существенно меньше радиуса трубы, можно воспользоваться результатами анализа устойчивости на пластине, где выделяют три этапа перехода. Первый этап достаточно хорошо описывается *двумерной теорией устойчивости волн Толлмина – Шлихтинга*. Число Рейнольдса, рассчитанное по длине от входа, для протяженности этого этапа не превышает 19000 [1]. Вторым этапом – этапом *конечных амплитуд возмущений скорости и давления*, где наблюдается сильное влияние трехмерности, исключаяющей двумерный подход, который характеризуется диапазоном чисел Рейнольдса, рассчитанных по размеру энергосодержащих вихрей, достигающих значений 6580 [2]. На этой стадии доминирующие структуры появляются либо в виде симметричных *подковообразных / лямбда- / шпичечных вихрей*, либо *квазипродольных вихрей* [3]. Эти вихревые образования нестабильны и разрушаются, способствуя переходу к третьему этапу, который характеризуется зарождением *турбулентных пятен* и последующим объединением этих пятен.

Таким образом, если переход наступает раньше, чем толщина пограничного слоя на поверхности трубы становится сопоставимой с радиусом трубы, говорить об устойчивости асимптотического параболического профиля не имеет смысла и можно рассматривать турбулентный режим с начального участка. Однако протяженность начальных участков для неизотермических потоков может составлять сотни диаметров и погрешность в определении термогидравлических характеристик становится неприемлемой.

Поэтому очень большой диапазон чисел Рейнольдса, выпадающий из области практического применения, требует дополнительных исследований для конкретных видов начальных участков, в которых возникают и формируются крупномасштабные возмущения, определяющие интегральные характеристики внутренних течений.

Анализ последних исследований. Переходные процессы в плоском канале и трубе [4] разделяют по характерному безразмерному параметру $t^* = tU_b / R$, где t – время; U_b – средняя скорость; R – радиус трубы, на три этапа.

Начальный этап, наблюдаемый до $t^* \leq 21$, характеризуется формированием тонкого пограничного слоя и единичных вихревых возмущений внутри него. Ядро потока остается невозмущенным. На этом этапе при числах Рейнольдса меньше 2000 конечные возмущения, внесенные в поток, затухают [5]. Более того, в работе [6] доказывают существование **критических** значений амплитуд начальных возмущений, необходимых для начала переходных процессов. С увеличением числа Рейнольдса критические значения амплитуд начальных возмущений уменьшаются.

На переходном этапе ($21 < t^* < 42$) существующие в потоке возмущения растут и формируют турбулентные пятна. Эти пятна распространяются по всей области течения и объединяются друг с другом. Течение становится полностью турбулентным при $t^* \geq 42$.

До $t^* = 30$ в трубе и плоском канале процессы перехода протекают одинаково. При $t^* > 30$ сравнение, проводимое путем оценивания как мгновенных, так и усредненных по ансамблю статистических значений гидродинамических характеристик, показало, что основные отличия проявляются в ядре потока, где разница в гидродинамических параметрах достигает до 20 % [4]. В трубе турбулизация основного потока происходит быстрее из-за более сильного перемешивания, так как пространство по периметру сужается по направлению к центру.

Бифуркационный процесс перехода в потоке в работе [7] анализируется на основании введенного, следуя *идее Ландау*, функционала, позволяющего отслеживать изменение возмущений определенного масштаба в зависимости от числа Рейнольдса, но, в отличие от *энергетического функционала Ландау*, критическое число Рейнольдса не постулируется, а определяется на основании *теории перколяции*. Пространственно-временной процесс появления турбулентных пятен в ламинарном потоке, образованных возмущениями различных масштабов, представляется *этапом бистабильности*, когда могут сосуществовать зоны соответствующие турбулентности и зоны регулярных многомасштабных дискретных возмущений.

Энергоэффективность при переходном режиме течения и существенной *неизотермичности потока* в трубах связывают с низкочастотными собственными возмущениями потока, которые видоизменяются гофрированной поверхностью трубы и приводят к существенному возрастанию теплоотдачи (до 3 раз) при соответствующем возрастании гидравлических потерь [8, 9].

Учитывая сказанное выше, задача определения условия формирования *асимптотического профиля* и его устойчивости на начальном участке трубы при изменяемой геометрии поверхности и неизотермичности потока остается актуальной.

Постановка задачи. Исследуется влияние частичного гофрирования теплообменной поверхности на переходные процессы в трубе. Рассматривается начальный участок трубы с диаметром $d = 70$ мм, длиной $45d$ с гофрированной вставкой длиной $4,3d$. Длина волны гофра $\lambda_{гоф} = 20$ мм, амплитуда $a = 3$ мм, угол наклона гофра к оси трубы $\beta = 70^\circ; 80^\circ; 90^\circ$ (рис. 1, а). Угол наклона гофрирования задается количеством заходов, так

при $\beta = 80^\circ$ шаг винтового гофрирования составлял $2\lambda_{\text{гоф}}$, при $\beta = 70^\circ - 4\lambda_{\text{гоф}}$. Для оценки степени влияния закрутки потока на переходные процессы и энергоэффективность результаты сопоставляются с прямым гофром с длиной волны $\lambda_{\text{гоф}}$ ($\beta = 90^\circ$). Площадь поверхности трубы с гофрированной стенкой больше площади гладкой трубы не более чем на 5%. Параметры потока на входе: $Re = 5300$ ($U_0 = 0,1 \text{ м/с}$), $Pr_f = 2,93$; на стенке число Прандтля составляет $Pr_w = 9,52$.



Рис. 1 – Геометрия трубы: а – геометрические параметры гофрирования; б – фрагмент расчетной сетки.

Задача исследования состоит в определении влияния *типа гофрирования* (прямое, витое) и угла наклона гофрирования на переходные процессы и энергоэффективность трубы.

Математическая модель. Для проведения математического моделирования течения на начальном участке частично гофрированной трубы выбран метод прямого численного моделирования. Математическая модель течения вязкой несжимаемой жидкости состоит из системы нестационарных трехмерных уравнений, записанных в декартовой системе координат:

– уравнения движения Навье – Стокса:

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

где $i, j = 1, \dots, 3$; ρ – плотность среды;

– уравнение неразрывности:

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

– уравнение энергии:

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

где μ – коэффициент динамической вязкости, представлен полиномиальной функцией [10]; a – коэффициент теплопроводности; c_p – теплоемкость.

Для конвективных членов уравнений модели выбрана схема дискретизации второго порядка точности, которая позволяет получить более точный результат в случае сложных течений.

В качестве схемы интерполяции уравнения коррекции давления также установлена схема второго порядка (Second Order Scheme).

В качестве алгоритма связи полей давления и скорости был выбран *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)* с коэффициентами релаксации для давления – 0,3, для момента – 0,7, для энергии и плотности – 1. С учетом достаточно мелкой сетки и небольшого шага по времени данный метод вполне удовлетворяет условиям исследования.

Фрагмент расчётной сетки приведен на рис. 1, б. Построена сетка смешанного типа: структурированная область вблизи стенок на входном и выходном патрубках и неструктурированная в ядре потока и гофрированной вставке. Наименьший размер ячеек у стенки трубы, значение параметра $h^+ = (\tau / \rho)^{0,5} - \Delta r / \nu$ (τ – напряжение трения, ν – кинематическая вязкость, Δr – шаг сетки) меньше 0,4, что позволяло достоверно описывать процессы в пристеночной области. Количество ячеек 5,2 млн. Шаг по времени подобран таким образом, чтобы значение числа Куранта не превышало 2.

При проведении расчетов контролировался процесс сходимости решения путем наблюдения за величиной невязок в ходе итерирования. Задавались абсолютные критерии сходимости, по которым невязки каждого уравнения на каждой итерации сравнивались с заданным минимальным значением 0,001.

Результаты математического моделирования. Численный эксперимент в гладкой трубе в осесимметричной постановке, результаты которого представлены в [10], показал затухание осцилляций в потоке при чис-

лах Рейнольдса меньших 2000. В потоках при $Re \geq 2300$ на некотором расстоянии от входа фиксируется появление низкочастотных осцилляций. В неизотермичных потоках воды при холодной стенке трубы это расстояние уменьшается. Так при числе Рейнольдса $Re \geq 5300$ и $\Delta T = 50^\circ$ это расстояние составляет $12d$.

В настоящей работе представляются результаты трехмерного численного моделирования развития возмущений в неизотермичных потоках в трубах с гофрированными вставками различной геометрии при таких же значениях числа Рейнольдса и температурного напора, что и в [10].

Для физических параметров потока превышение уровня осцилляций порогового значения амплитуды в 5 % от среднего значения считается точкой потери устойчивости. Расстояние от входа до этой точки составляет $11d$, что коррелирует с двумерной постановкой задачи. Формирующиеся упорядоченные синусоидальные колебания, распространяясь вниз по потоку, увеличиваются по амплитуде, что показано на примере развития возмущений напряжения трения на поверхности труб (рис. 2). При этом на начальном этапе длины волн практически не меняются и составляют $\lambda = (0,55 \dots 0,65)d$. Безразмерная фазовая скорость этих возмущений относительно местной максимальной скорости U изменяется в диапазоне $C_\phi / U = 0,5 \dots 0,56$. По мере продвижения вниз по течению характер колебаний меняется. Упорядоченные синусоидальные колебания на расстоянии от входа порядка $15d$ скачкообразно переходят в нерегулярные. Хаотизация этого переходного процесса происходит на фоне существенного возрастания масштабов возмущений, что показано на примере изменения характера распределения значений напряжения трения на участке между $15d$ и $21d$.

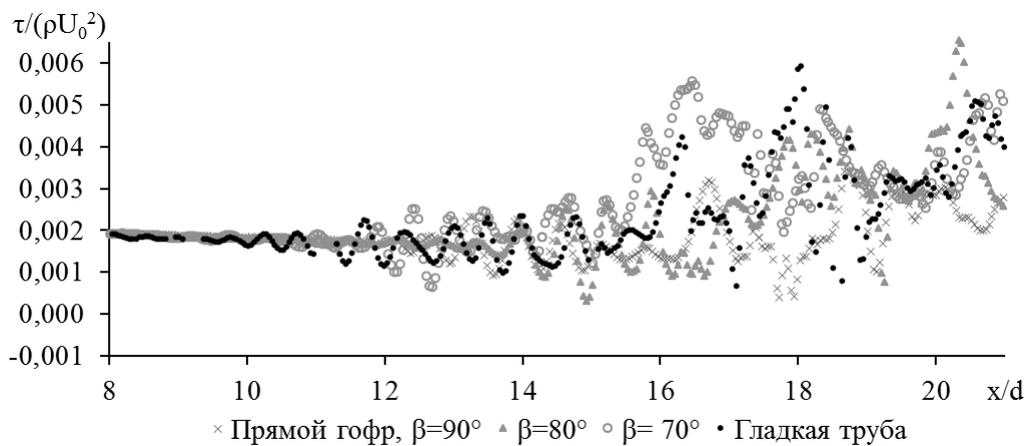


Рис. 2 – Значение напряжения трения τ_x на входном патрубке.

В область гофрированной вставки набегают возмущенный поток с длинами волн, двукратно превышающими длину волн гофров. Внутри гофрированной вставки происходит наложение собственных длинноволновых возмущений потока и относительно коротковолновых возмущений, генерируемых гофрированием, что приводит к существенным изменениям напряжения трения (рис. 3).

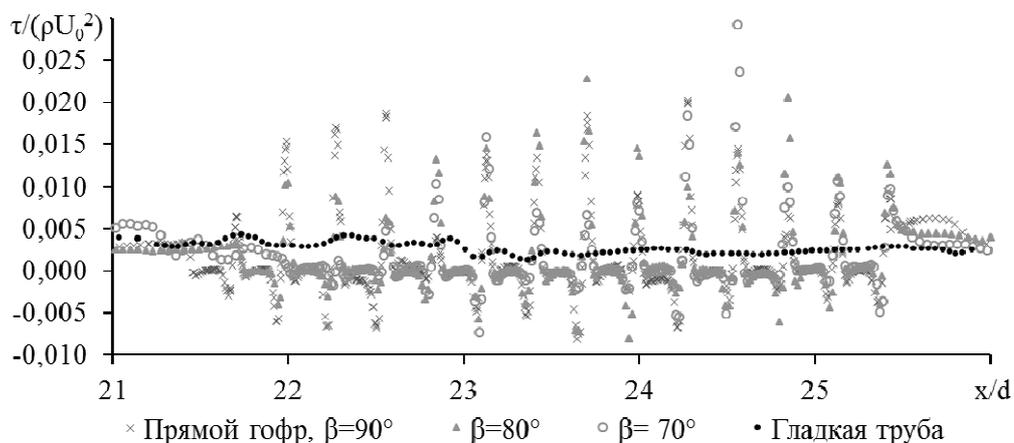


Рис. 3 – Напряжение трения τ_x на гофрированной вставке.

Изменения физических параметров в углублениях гофров обусловлены коротковолновыми возмущениями. Внутри гофров формируется сложная вихревая система (рис. 4) изменяющаяся от гофра к гофру. В начале гофрированной вставки внутри первых углублений формируются моновихревые структуры, интенсивность которых увеличивается при движении вниз по потоку. По мере развития возмущений увеличиваются значения физиче-

ских параметров на гребнях гофров (рис. 3). В конце гофрированной вставки в углублениях формируются *несимметричные многовихревые структуры*, прижатые к наветренной стороне гофра. Вместе с тем разница осредненного значения напряжения трения по длине гофрированной вставки, по сравнению с аналогичным участком гладкой трубы, не превышает 20 %.

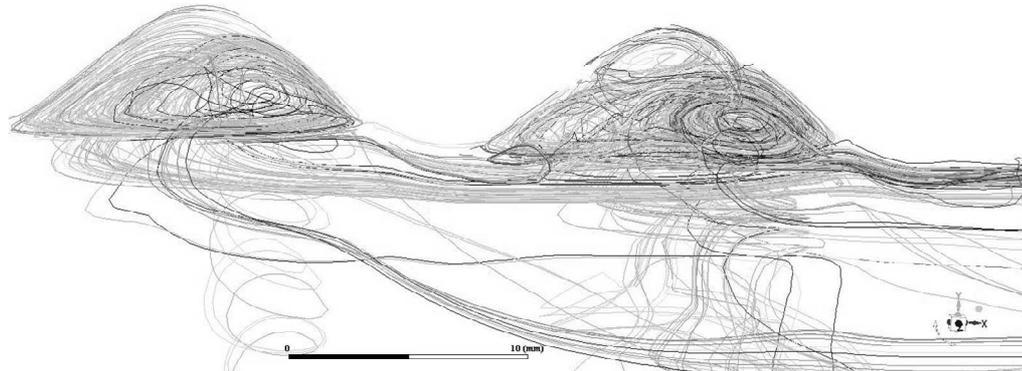


Рис. 4 – Вихревая структура в углублении гофрированной вставки при $\beta = 80^\circ$.

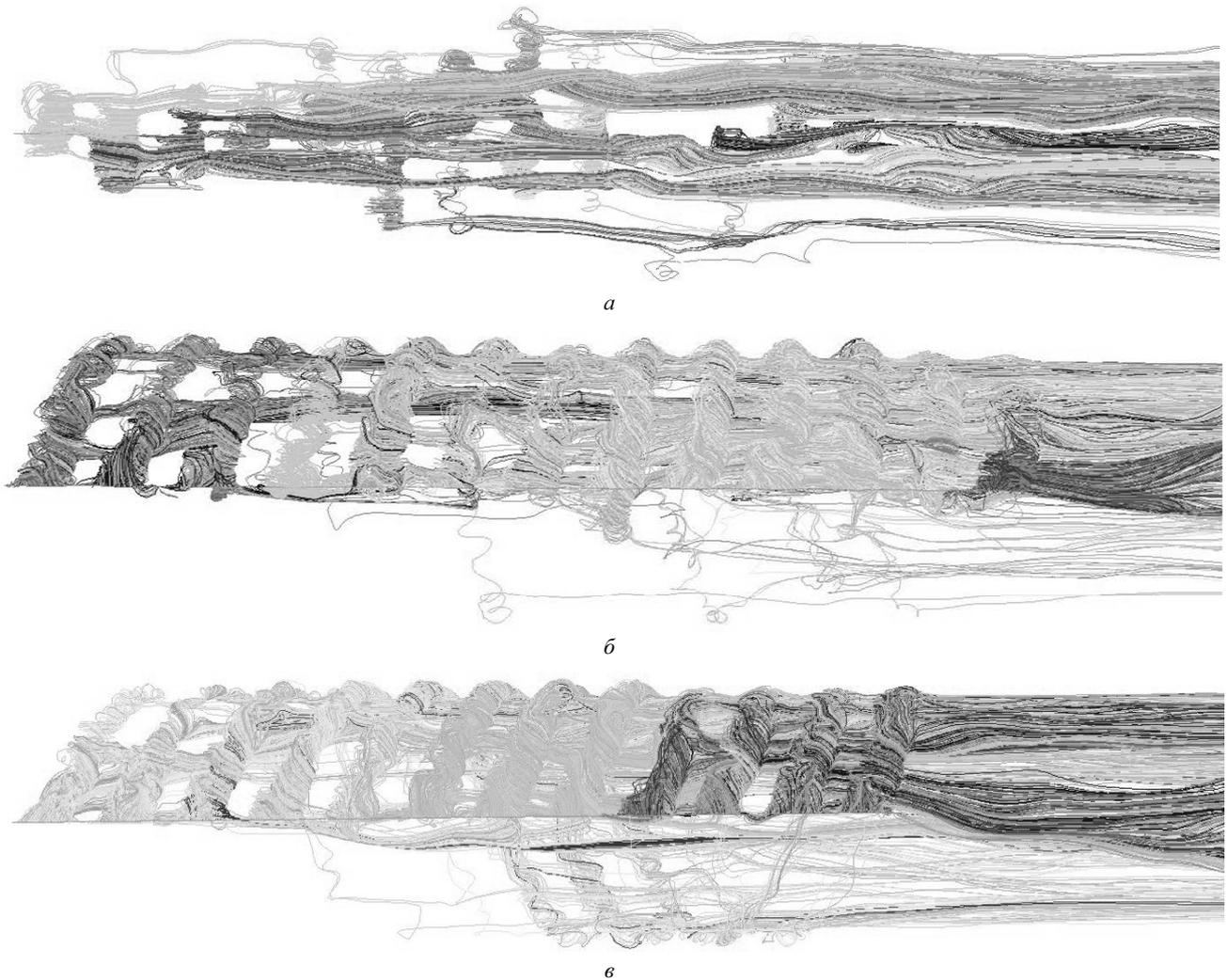


Рис. 5 – Треки меченых частиц на участках гофрированных вставок и в следе за ними: а – $\beta = 90^\circ$; б – $\beta = 80^\circ$; в – $\beta = 70^\circ$.

С уменьшением угла β устойчивость вихревого движения внутри углублений гофров увеличивается, что показывают траектории меченых частиц, представленные на рис. 5. Частица, попадая в углубление гофра, отклоняется от движения вдоль оси трубы. Становясь частью вихревого образования одновременно с движением по линии, образующей гофра, она вовлечена во вращательное движение внутри углубления. При прямом гофрировании частицы, попадая в углубление и совершая вихревые движения внутри него, практически не теряют

своего сечения, переходя в следующее углубление гофра. Частица, покинувшая углубление гофра, быстро уносится основным течением, способствуя *массообмену* между углублением и ядром потока, а также другими углублениями, куда частица попадает с большей энергией. При витом типе гофрирования частица покидает углубление на большем расстоянии от места попадания в углубление, и в каждом последующем гофре это расстояние увеличивается, но при этом снижается интенсивность теплообмена из-за менее интенсивного массообмена с ядром потока. Покидая гофрированную вставку, возмущения трансформируются в длинноволновые нерегулярные образования с изменяемыми длинами волн и резко возрастающими амплитудами, фазовая скорость которых стремится к местной максимальной скорости потока.

Значения перепада давления возрастает с увеличением угла β и при прямом гофрировании ($\beta = 90^\circ$) превышает перепад давления в гладкой трубе при данном числе Рейнольдса и разнице температур на 10 %.

Перспективы дальнейших исследований. Для более детального изучения влияния угла β на процессы перехода в трубах с гофрированными вставками целесообразно провести исследования в более широком диапазоне углов наклона гофрирования к оси трубы. Целесообразно изучить и влияние длины углубления гофра на процессы перехода.

Выводы. Полученные результаты численного моделирования возникновения и развития возмущений в трубе при переходных числах Рейнольдса в неизотермическом потоке подтверждают трехэтапность перехода с изменением структуры возмущений от регулярных длинноволновых возмущений, аналогичных волне Толлмина – Шлихтинга, но с конечной амплитудой, к многочастотной структуре возмущений с изменяемыми длинами волн и фазовыми скоростями их распространения, с вырождением высокочастотных составляющих, что приводит к образованию прослоек, аналогичных *турбулентным пятнам Эммонса*. Гофрированная поверхность, генерирующая вихревые возмущения в соответствии с длиной волны гофра, изменяет структуру возмущений основного потока, навязывая ему масштабы возмущений гофрированной поверхности, что способствует затягиванию переходных процессов, но, сохраняя крупномасштабные вихревые структуры, что приводит к существенному увеличению тепловых потоков.

Список литературы

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.
2. 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.
3. Cossu C., Pujals G., Depardon S. Optimal transient growth and very large-scale structures in turbulent boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2009. – Vol. 619. – P. 79 – 94.
4. He K., Seddighi M., He S. DNS study of a pipe flow following a step increase in flow rate // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2016. – Vol. 57. – P. 130 – 141.
5. Avila M., Willis A. P., Hof B. On the transient nature of localized pipe flow turbulence // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2010. – Vol. 289. – P. 83 – 114.
6. Darbyshire A. G., Mullin T. Transition to turbulence in constant-mass-flux pipe flow // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1995. – Vol. 646. – P. 127 – 136.
7. Barkley D. Theoretical perspective on the route to turbulence in a pipe // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 803. – P. 1 – 79.
8. 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.
9. Hærvig J., Condra T., Sørensen K. Numerical Investigation of Single-phase Fully Developed Heat Transfer and Pressure Loss in Spirally Corrugated Tubes // *Proceedings of the 56th SIMS*. – Linköping, Sweden, 2015. – P. 391 – 397.
10. Баскова А. А., Воронаев Г. А. Структура вихревого неизотермического течения на начальном участке трубы при переходных числах Рейнольдса // *Гидродинамика и акустика*. – 2018. – Т. 1 (91). – № 2. – С. 117 – 131.

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.
2. 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.
3. Cossu C., Pujals G., Depardon S. Optimal transient growth and very large-scale structures in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*. 2009, vol. 619, pp. 79–94.
4. He K., Seddighi M., He S. DNS study of a pipe flow following a step increase in flow rate. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2016, vol. 57, pp. 130–141.
5. Avila M., Willis A. P., Hof B. On the transient nature of localized pipe flow turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010, vol. 289, pp. 83–114.
6. Darbyshire A. G., Mullin T. Transition to turbulence in constant-mass-flux pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1995, vol. 646, pp. 127–136.
7. Barkley D. Theoretical perspective on the route to turbulence in a pipe. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016, vol. 803, pp. 1–79.
8. 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.
9. Hærvig J., Condra T., Sørensen K. Numerical Investigation of Single-phase Fully Developed Heat Transfer and Pressure Loss in Spirally Corrugated Tubes. *Proceedings of the 56th SIMS*. Linköping, Sweden, 2015, pp. 391–397.
10. Baskova A. A., Voropaev G. A. Struktura vikhrevogo neizotermicheskogo techeniya na nachal'nom uchastke truby pri perekhodnykh chislakh Reynol'dsa [Structure of vortex nonisothermal flow in the initial section of a pipe at transient Reynolds numbers]. *Gidrodinamika i akustika* [Hydrodynamics and Acoustics]. 2018, vol. 1 (91), no. 2, pp. 117–131.

Поступила (received) 16.03.2019

Воропаєв Геннадій Олександрович (Voropaev Gennadii Aleksandrovich) – доктор фізико-математичних наук, професор Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: +38(044)371–65–17; e-mail: voropaev.gena@gmail.com.

Баскова Олександра Олександрівна (Baskova Aleksandra Aleksandrovna) – магістр, провідний інженер, Інститут гідромеханіки НАН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (068) 198-93-75; e-mail: BaskAleksandra@gmail.com.

УДК 532.526.517

Г. О. ВОРОПАЄВ, Н. Ф. ДИМИТРИЄВА

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОРОВИХ ТЕЧІЙ В НАПІВЦИЛІНДРИЧНОМУ ЗАГЛИБЛЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІДКРИТИХ ПАКЕТІВ SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW

Чисельними методами з використанням високопродуктивних обчислювальних технологій досліджено нестационарну тривимірну структуру течії в напівциліндричному заглибленні. Обговорюються закономірності формування і розподілу системи вихорів, що виникають в заглибленні залежно від числа Рейнольдса, розмірів і повороту до потоку. Показано, що велику роль грають бічні стінки, що формують складну систему, що руйнує головний трансверсальний вихор та сприяє його викидам.

Ключові слова: напівциліндричне заглиблення, генератор вихорів, керування примежовим шаром, чисельне моделювання.

Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. Ф. ДИМИТРИЄВА

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОЛУЦИЛИНДРИЧЕСКОМ УГЛУБЛЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ОТКРЫТЫХ ПАКЕТОВ SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW

Численными методами с использованием высокопроизводительных вычислительных технологий исследована нестационарная трехмерная структура течения в полуцилиндрическом углублении. Обсуждаются закономерности формирования и распределения системы вихрей, возникающих в углублении в зависимости от числа Рейнольдса, размеров и поворота к потоку. Показано, что важную роль играют боковые стенки, формирующие сложную систему, которая разрушает главный трансверсальный вихрь и способствует его выбросам.

Ключевые слова: полуцилиндрическое углубление, генератор вихрей, управление пограничным слоем, численное моделирование.

G. A. VOROPAIEV, N. F. DIMITRIEVA

NUMERICAL SIMULATION OF VORTEX FLOWS IN A SEMI-CYLINDRICAL DIMPLE USING SALOME, OPENFOAM, PARAVIEW OPEN SOURCE PACKAGES

Transient 3D flow structure in a semi-cylindrical dimple is investigated by numerical methods using high-performance computing technologies. Patterns of formation and distribution of the system of vortices that occur in the dimples depending on the Reynolds number, size and rotation to the flow are discussed. It is shown that the side walls forming a complex system of vortices play an important role. The wall destroys the main transversal vortex and contributes to its emissions into the external flow. The proposed method of numerical simulation has shown its effectiveness in a wide range of parameters of the problem and is consistent with experimental data.

Key words: semi-cylindrical dimple, vortex generator, flow control, numerical simulation.

Вступ. Керування примежовим шаром генерацією вихорів нав'язує турбулентній течії детерміновану вихрову структуру заданого масштабу та інтенсивності, яка може призводити до зменшення швидкості наростання товщини примежового шару вниз за течією та підтримувати енергетичний баланс між *пульсаційним полем* і *осередненою течією*. Під час відриву вихорів з гострих кромek *вихорогенераторів*, в примежовий шар обтічного тіла або в відривну течію генеруються досить стійкі поздовжні вихори [1, 2]. Характерні масштаби цих вихрових структур, їх інтенсивність визначають кількісні значення величин аерогідродинамічного опору рухомих тіл.

Аналіз попередніх досліджень. Проблема вивчення вихрових структур у турбулентному примежовому шарі на поверхні з геометричними неоднорідностями, умов їх виникнення і розвитку залишається актуальною і на сьогодні, не дивлячись на те, що цій проблемі вже присвячено величезну кількість експериментальних і теоретичних досліджень. За допомогою використання заглиблень, що нанесені на обтічну поверхню, є можливість значно підвищити ефективність багатьох інженерно-технічних систем. При цьому використовується багато чинників складного механізму утворення вихорів всередині заглиблень, їх масштабна різноманітність і особливості викиду назовні із обтічних лунок. Використання груп ідентичних заглиблень часто дають суттєвий вииграш у збереженні питомої енергії, а також для досягнення кращих якостей обтічних поверхонь [3].

Підвищена зацікавленість до використання сферичних заглиблень в якості інтенсифікаторів теплообміну та елементів керування примежовим шаром пов'язана головним чином з тим, що спортивне знаряддя, наприклад, м'яч для гри у гольф, яке має на своїй поверхні лунки, мають тенденцію пролітати більшу відстань [4]. Також елементи організованої шорсткості мають: м'ячі для гри в баскетбол, волейбол, футбол, які називають швидкісними м'ячами.