

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Оригинальная статья / Original Paper

Моделирование динамики смерчевых структур в трубе с турбулизаторами
квадратных, полукруглых и треугольных профилей

И.Е. Лобанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование изменения по времени смерчевых композиций в каналах с выступами полукруглых, треугольных, квадратных профилей для средних критериев Рейнольдса на базе многоблочной вычислительной технологии с решением конечно-объёмными факторизованными способами уравнения Рейнольдса и уравнений энергий. **Метод.** Расчёты проводились на основе теоретических подходов, основанных на решении конечно-объёмными факторизованными способами уравнений Рейнольдса, которые замыкались при помощи моделирования ментеровских напряжений и энергии структурированной сетке. **Результат.** Расчёты параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, показали, что превышающая диссипации выработки турбулентностей для выступов острых профилей - квадратный профиль, треугольный профиль - и скруглённых профилей - полукруглый профиль, сегментный профиль - обеспечивается с кардинально различными гидравлическими потерями: у каналов с выступами скруглённых профилей. Например, у полукруглых, коэффициенты гидравлических сопротивлений гораздо меньше, чем у каналов с выступам с острыми профилями, у треугольных или у квадратных, прямоугольных. **Вывод.** Произведено моделирование смерчевых композиций, зависящих от времени, в каналах с трансверсальными профилями в виде квадрата, треугольника и полукруга, что максимально информативно в плане изучения турбулизованных течений и теплообмена, возникающих при средних критериях Рейнольдса на базе компьютерной многоблочной технологии при использовании решения конечно-объёмными факторизованными способами (ФКОМ-ами) рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений. Рассмотрению были подвергнуты выступы: квадратных трансверсальных профилей, в которых смерчеобразования наиболее проявлены, а побочные смерчи воздействуют на поток максимальным образом; треугольных трансверсальных профилей, где смерчеобразования проявляются не так сильно, а побочные смерчи влияют на основной поток слабее, чем при квадратных выступах; полукруглых трансверсальных профилей, в которых набегающий главный смерч перемещается по потоку с генерированием ограниченных побочных смерчей. Полученная расчётная информация в высокой степени коррелирует с имеющимися опытными данными, что указывает на верификацию задействованного моделирования.

Ключевые слова: теплообмен, течение, турбулизатор, поперечное сечение, моделирование, динамика, нестационарный, смерч, полукруглый, треугольный, прямоугольный, квадратный

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование динамики смерчевых структур в трубе с турбулизаторами квадратных, полукруглых и треугольных профилей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (3): 26-38. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Modeling of the dynamics of tornado structures in a pipe with turbulators of square, semicircular and triangular profiles

Igor E.Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe highway, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia

Resume. Objectives. To carry out mathematical simulations of changes in time of tornado compositions in channels with projections of semicircular, triangular, square profiles for average Reynolds criteria based on multiblock computing technology with the solution of finite-volume factorized methods of the Reynolds equation and energy equations. **Method.** The calculations were carried out on the basis of theoretical approaches based on the solution of Reynolds equations by finite-volume factorized methods, which were closed using the simulation of Menter stresses, and the energy of a structured grid. **Result.** The calculations of time-dependent flow and heat transfer parameters carried out in the article showed that the excess dissipation of turbulence generation for projections of sharp profiles - square profile, triangular profile - and rounded profiles - semicircular profile, segment profile - is provided with radically different hydraulic losses: channels with protrusions of rounded profiles, for example, semicircular, have much lower hydraulic resistance coefficients than channels with protrusions with sharp profiles, for example, triangular or square, rectangular. **Conclusion.** In the article, mathematical simulations of time-dependent tornado compositions were performed in channels with transversal profiles in the form of a square, triangle and semicircle, which is as informative as possible in terms of studying turbulent flows and heat transfer arising under average Reynolds criteria based on computer multiblock technology when using solutions of finite-volume factorized methods (FCOM-am) Reynolds equations and energy equations. The following protrusions were considered in the article: square transversal profiles, in which tornadoes are most pronounced, and side tornadoes affect the flow in the maximum way; triangular transversal profiles, where tornadoes are not so strong, and side tornadoes affect the main flow weaker than with square protrusions; semicircular transversal profiles, in which the incoming main tornado moves along the stream with the generation of limited side tornadoes. The calculated information obtained in the article correlates to a high degree with the available experimental data, which indicates the verification of the mathematical modeling involved in the article.

Keywords: heat transfer, flow, turbulator, cross-section, modeling, dynamics, unsteady, tornado, semicircular, triangular, rectangular, square

For citation: I.E. Lobanov. Modeling of the dynamics of tornado structures in a pipe with turbulators of square, semicircular and triangular profiles. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (3): 26-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-26-38

Введение. Общеизвестным и довольно надёжным в практическом отношении методом смерчевого интенсифицирования теплоотдачи представляет собой способ нанесения повторяющихся турбулизаторов на стенках омываемой поверхности [1, 5] (рис.1). Изучение структур интенсифицированных потоков, как правило, проводилось опытными способами [2, 5, 6]. Однако, теоретические исследования на современном этапе в данном направлении достаточно ограничены [1-4] и только частичным образом посвящались напрямую структурам интенсифицированных течений. В ряде способов, в том числе, в исследованиях [4, 7-9], были применены не более чем среднеинтегральные способы подхода к рассматриваемой задаче. На современном этапе интенсивным образом получили развитие методы на базе многоблочных вычислительных технологий при решении задачи смерчевой гидроаэромеханики и теплообмена, которые основываются на структурированной пересекающейся сетке.

Постановка задачи. Настоящая статья направлена на исследование нестационарной

теплоотдачи для средних критериев Рейнольдса в трубе, которая интенсифицируется посредством поверхностных периодических турбулизаторов с полукруглыми, прямоугольными, треугольными поперечными сечениями, где смерчеобразования могут проявляться в максимальном или минимальном отношении.

Методы исследования. Моделирование при изучении местных и интегральных характеристик потоков и теплоотдачи, зависящих от времени, в каналах с выступами является многообещающим для разработки специализированного распараллеленного вычислительного пакета на базе многоблочной технологии, целенаправленного какого-либо охарактеризуем нижеследующим способом.

Процесс развития специфической многоблочной вычислительной технологии [1-4], основанной на пересекающейся многомасштабной структурированной сетке, для высокоэффективных и уточнённых решений для нестационарной 2-мерной и 3-х-мерной задачи конвекционного теплопереноса в прямой круглой трубе с систематическими шероховатостями в форме выступа в однородных рабочих средах в довольно широких диапазонах критериев Рейнольдса (от $Re=10000$ до $Re=1000000$) и критериев Прандтля (от $Pr=7/10$ до $Pr=12$).

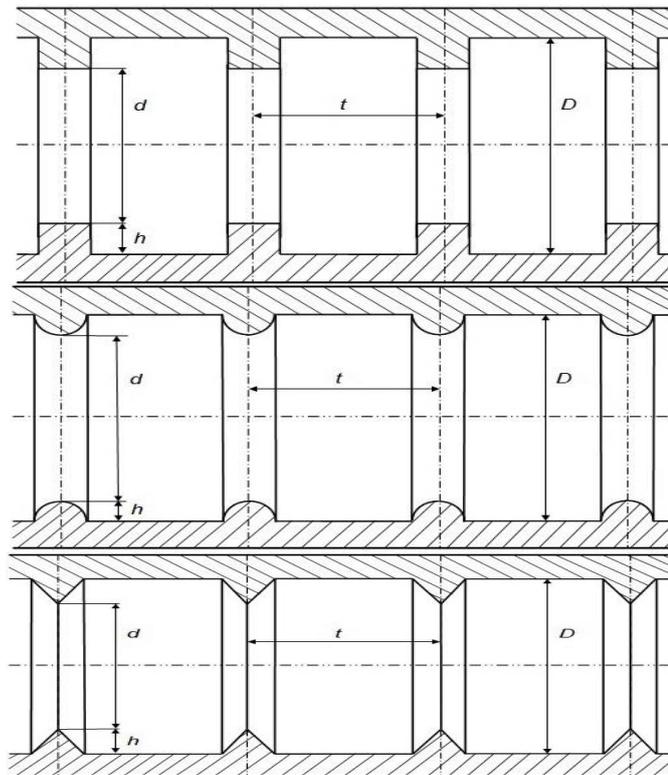


Рис. 1. Разрезы прямых круглых труб с поперечно установленными поверхностными выступами потоков квадратных, полукруглых и треугольных профилей
Fig. 1. Sections of straight round pipes with transversely installed surface protrusions of flows of square, semicircular and triangular profiles

Отличительная особенность данного варианта расчёта заключена в том, что методика расширяется применением циклических граничных условий, которые позволили прогнозировать асимптотичность характеристик каналов с дискретными шероховатостями. Данный вариант расчёта позволяет увеличить вычислительную результативность при моделировании и осуществлять корректирование линии токов по кривизне. Для канала с выступами с различными профильными сечениями при вычислениях рассчитываются: размещения местных и осреднённых температурных параметров и параметров течения на поверхности (гидравлические потери, давление,

тепловой поток, сопротивление движения, трение), профили скоростной составляющей, профили давлений, профили температур, атрибуты турбулентностей (генерация турбулентности, турбулентная энергия, диссипация, вязкость турбулентности, тензор напряжения Рейнольдса, и т.д.).

Основополагающие системы дифференциальных уравнений в частных производных (уравнение Рейнольдса, уравнение Навье–Стокса) замыкаются посредством модифицирования при учёте искривления линии токов в соответствии с ментеровской моделью и моделью переносов напряжения сдвига.

Основополагающую информацию по управляющим системам уравнений, соответствующим граничным условиям можно почерпнуть в [13]. Применяются специфические процедурные корректирования среднеобъёмных температур и давлений для периодических граничных условий.

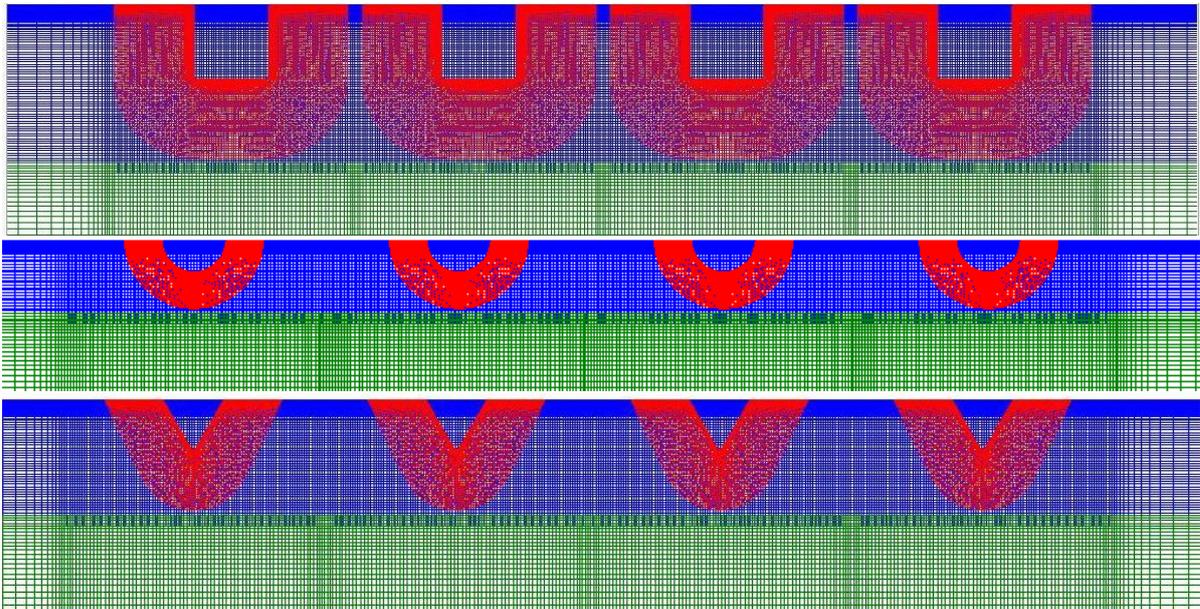


Рис. 2. Сетки каналов, состоящие из некоторого количества секций с центральным выступом, входных и выходных гладких областей; для периодических задач используют единственную секцию

Fig. 2. Grids of channels, consisting of a number of sections with a central protrusion, inlet and outlet smooth regions; for periodic tasks use a single section

Методика решений системы основных уравнений концептуально заключается в расщеплении на физические процессы для процедуры корректирования давлений. При периодических задачах для граничных условий используются процедурные корректирования среднемассовых температур и градиентов давлений. Методологические основы вычислительных расчётных инструментариев базируются на вычислительных многоблочных технологиях с применением разномасштабной пересекающейся структурированной сетке, что позволяет уловить специфические структурные элементы смерчевых потоков и температурных полей с обеспечением необходимых эффективности и точности, не уступающих адаптивным сеткам.

Специфические качества, которые характерны периодическим граничным условиям, следует рассмотреть более подробно, поскольку они конкретно используются при расчётах в данной статье. Периодичность у граничных условий приводит к рационализации в конструировании сеток труб (рис. 2). Канал фрагментируется (рис. 2) на определённое секционное число при расположении в их центрах выступами, выходного гладкого участка, входного гладкого участка.

Периодическая постановка задачи предусматривает единственную секцию; в других

случаях применялось разнообразное их количество: в исследованиях [1-4, 7-12] секционное количество достигало двенадцати. Верифицирование расчётов подразумевало такое же их число.

В целях снижения количества узловых элементов расчёта в канале фиксируются подробнейшие пристеночные интервалы (синие сетки), и осевые сетки фиксируются разрежённые (зеленые сетки), поэтому уровни детализаций видоизменяются в продольном направлении. Если решается 3-х-мерная объёмная задача, то уровни детализаций будут видоизменяться также в окружном направлении. В дополнении к этому, в трёхмерных случаях в приосевых пространствах вводятся спецсетки, нивелирующие паразитное сеточное близосевое сгущение. Вышесказанное для остальных эквивалентных условий снижает требуемое количество ячеек расчёта около полутора раз, что ещё более важно при вычислении параметров течений и теплоотдачи в трёхмерной постановке. Есть возможность дополнительного сокращения количества ячеек при применении продольных осевых условий периодичности и устранения входных и выходных участков.

В гидродинамическом отношении постановка периодической задачи является задачей при сохранности наперёд назначенных массовых расходов теплоносителя, которые рассчитываются при единичных входных скоростях. В контексте расчёта теплоотдачи задача может решаться в двух вариантах в соответствии с избранными температурными граничными условиями.

Первый вариант: при стенках с постоянными температурами решение проблемы производится на основе неизменности во входных сечениях среднеобъёмных температур. Второй вариант: при известных градиентах среднеобъёмных температур, вычисляемых по значению теплового потока на стенках. Очевидно, что входные температуры в данных случаях не регистрируются. В дополнении периодических полных регистраций текущих состояний вычисляемых параметров в программах предусмотрены средства вычисления при заданных интервалах выбранных фиксаций при накоплении в файлах, что представляет интерес при вычислении параметров течения и теплоотдачи, зависящих от времени.

Главный интерес следует сделать на детерминирование местных и осреднённых параметров конвективной теплоотдачи, переменных по времени; конкретнее: гидравлических потерь, составляющих скоростей, среднего по выделенным поверхностям стенок труб теплообмену, вычисление турбулентных параметров составляющих уравнений турбулентных пульсационных энергий (конвективных переносов, диффузионных переносов, генераций, диссипаций). При внешнем натекании на прямоугольные турбулизаторы похожий метод ранее применялся в статье [14].

Часть главной цели настоящей статьи заключается в верифицировании применённой расчётной методики для параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, в каналах с выступами при средних критериях Рейнольдса, которые изучались при аналогичных опытах [5, 6]. Вслед за вышеупомянутым верифицированием появляется возможность проведения расчётов параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, у преимущественно типовых вариантов интенсифицированной теплоотдачи в каналах с выступами полукруглых, треугольных, квадратных трансверсальных профилей с проведением аналитического исследования проведённого расчётного материала при раскрытии специфики потока и теплоотдачи в связи с разным типом трансверсального профиля.

Численные данные, приведённые в работе [15], детерминировали местные и осреднённые параметры потоков и теплоотдачи в круглой прямой трубе с выступами квадратных и полукруглых трансверсальных профилей.

Анализирование смерчевых композиций в канале с выступами квадратных профилей показывает, что при относительно больших выступах и с больших критериях Рейнольдса небольшие увеличения относительных критериев Нуссельта происходят при больших

увеличениях относительных гидросопротивлениях вследствие существенного воздействия реверсивных потоков, причём может иметь место натекание обратных течений на верхнюю площадку выступа [1-4, 7-10, 15].

У выступов с полукруглым трансверсальным профилем воздействие реверсивных смерчей на весь поток гораздо слабее, чем у выступов с квадратным трансверсальным профилем, поскольку реализуется сильная деформация главного смерча без его разрушения.

Гидравлические сопротивления в каналах с выступами полукруглых трансверсальных профилей существенно ниже, для других эквивалентных параметров, чем в каналах с выступами квадратных трансверсальных профилей, поэтому они в этом плане более оптимальны.

В дальнейшем, основываясь на вышеприведённом обобщённом анализе, можно переходить к конкретным вычислениям и частным анализам полученной численной информации относительно параметров потока и теплоотдачи, зависящих от времени, в том числе, относительно изменяющихся по времени смерчевых композиций в каналах с выступами с треугольными, квадратными, полукруглыми трансверсальными профилями.

Обсуждение результатов. Анализ экспериментальных исследований, проведённый в работах [5, 6, 16], указывает на то, что смерчевые структуры в канале с выступами могут существовать как нестационарные при определённых диапазонах потока.

Теоретическое исследование теплоотдачи в трубе при наличии турбулизаторов, выполненное в научных трудах [1-4, 7-12, 15], было проведено в целях расчётов местных и осреднённых параметров течений и теплоотдачи при условиях установившихся стационарных потоков. Там же расчётные данные верифицировались имеющимся экспериментальным материалом, что обосновывает применение этого расчётного метода для детерминирования характеристик нестационарного потока и теплоотдачи в каналах с выступами.

Вычисление параметров потоков и теплоотдачи, изменяющихся по времени, в каналах с выступами даёт возможность обнаружения тех аспектов у течений, отличающихся от стационарных случаев течений, которые могут в некотором роде выступать в роли математических ожиданий потоков.

Интегрально в статье ставилась исследовательская цель: продемонстрировать, как генерируется, развиваются, движутся, распадаются по времени композиции смерчеобразований в каналах с выступами с различными трансверсальными профилями, а именно: квадратных, полукруглых, треугольных.

Имеющаяся в наличии опытная информация [5, 6] указывает на то, что смерчевые структуры могут иметь нестационарную структуру, к примеру, при условиях течений водяного теплоносителя в прямоугольных каналах с выступами с критериями Рейнольдса $Re=170000$.

Дадим характеристику нестационарным смерчевым композициям для вышеприведённых условий с $t/h=7,0$ (рис. 3). В окрестностях точки A и точки B генерируется пара смерчей, быстрорастущих и в сильной степени в отношении собственных размеров.

Смерчи в окрестности точки A возрастают ещё более быстро смерчей в районах точки B . Как только смерчи в окрестности точки A достигнут в величинах, соизмеримых с двумя высотами турбулизаторов, смерчи в окрестности точки B достигнут величин, соизмеримых с высотой турбулизаторов.

В последующем генерируются ещё более слабые смерчи в окрестностях точки C , а смерчи в окрестности точки A перемещаются к последующим турбулизатором; затем эти смерчи интегрируются со смерчами в окрестности точки B .

Впоследствии объединённые смерчи перекатываются поверх выступа, а затем имеет место их дезинтеграция. В эти же самые моменты времени смерч в окрестности

точки C возрастает до величин высот турбулизаторов и тоже диссоциируется. После этого вышеупомянутые явления воспроизводятся вслед за генерацией обновлённых смерчей в окрестностях точки A и точки B .

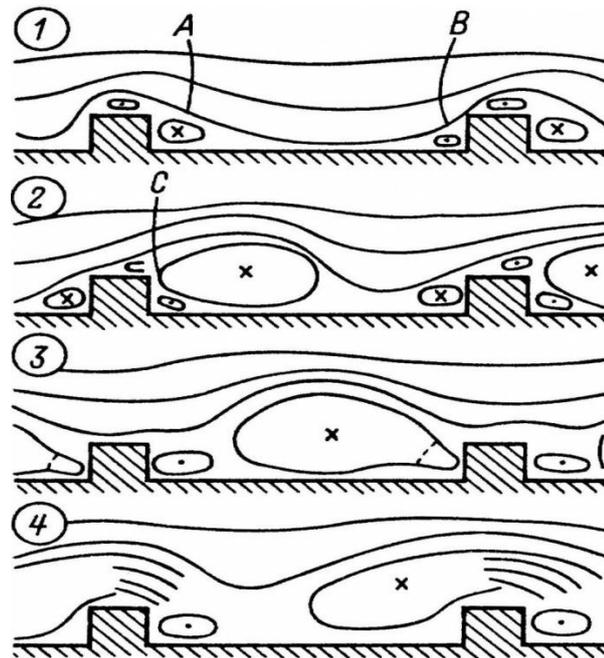


Рис. 3. Схематичное визуализирование опытных данных [5, 6] динамики формирования смерчевых композиций для течения водяного теплоносителя в прямоугольных каналах с выступами в виде квадрата на различных временных моментах (1-4)

Fig. 3. Schematic visualization of experimental data [5, 6] of the dynamics of the formation of tornado compositions for the flow of a water coolant in rectangular channels with square-shaped protrusions at different time points (1-4)

Здесь для описания нестационарного характера при развитии смерчевых композиций следует принять во внимание, что выработки турбулентностей имеют место именно на границе вихревой зоны, как в процессе их формирования, так и в процессе распада этой смерчевой зоны вслед за её выбросом.

В контексте настоящей статьи были осуществлены теоретические математические моделирования зависящих от времени течений и теплоотдачи в каналах при наличии выступов с умеренными критериями Рейнольдса, основанные на использовании вычислительной многоблочной технологии, основанной на решениях конечно-объёмными факторизованными методами (ФКОМами) рейнольдсового уравнения, замыкаемого при помощи ментеровских переносных моделей сдвигового напряжения и энергетических уравнений с разномасштабными пересекающимися структурированными сетками, что уже в [1-4, 7-12, 15] успешным образом выполнялось при расчёте сопоставимых стационарных расчётных условий.

Подробно подвергнутые анализу в [16] результаты опытных данных позволяют сделать вывод, что интенсивные пульсации и торможения у стенок порождают распад ядер к крупномасштабным переворотам, создающих несколько выбросов на внешних краях и биения о стенки (рис. 4).

В данном случае имеет место преобладание переворотов, шириной, которая составляет половину толщин пограничных слоёв, а её длина соответствует толщинам пограничных слоёв. На протяжении процессов биений смерч разлагается на несколько присоединившихся смерчей, которые чередуются на определённых интервалах.

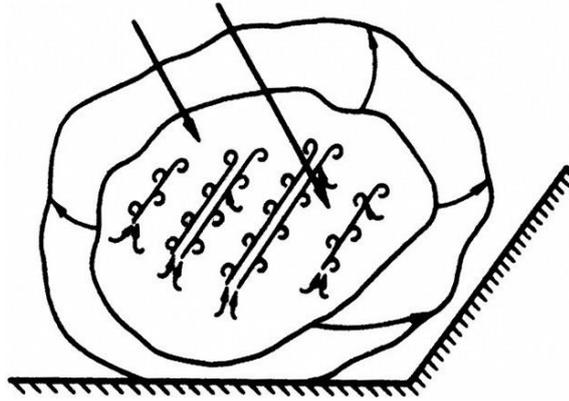


Рис. 4. Схематичное визуализирование зарождения обоснованно перемежающихся возвратных потоков при ударе смерчей («комков») о наклонные уступы

Fig. 4. Schematic visualization of the origin of reasonably intermittent return flows when tornadoes ("lumps") strike on inclined ledges

Вязкие (ламинарные) подслои самопроизвольно распадаются на смерчевые потоки. Для сравнительно небольших критериев Рейнольдса возникают каскады смерчей типа гёртлеровских вихревых систем [16].

Вычисленный расчётный результат для нестационарных течений воздушного теплоносителя в круглой трубе с выступами полукруглых, квадратных, треугольных трансверсальных профилей для периодичной постановки приводится на рис.5 при условиях $Re=170000$; $t/h=7,0$, что эквивалентно $t/D=7/20$; $d/D=9/10$.

Фрагментарным образом линии токов ($0-20$) представляются на рис.5 для выступов с различными трансверсальными профилями при одинаковых значениях безразмерных времён. На рис.5 очень хорошо заметна вычисленная динамическая картина движения неустановившихся смерчевых композиций в трубах при турбулизаторах с разными трансверсальными профилями.

Фрагментарно генерация нестационарных смерчей за выступом квадратного поперечного профиля их разрастания с позднейшим максимальным увеличением с продвижениями в направлении последующих выступов отчётливо видна на рис.5.

После этого вышеупомянутый смерч поджимается при набегательном движении на последующие квадратные выступы, а ещё, после этого, осуществляются обтекания вышесказанных квадратных выступов. Впоследствии времени данное явление циклически воссоздаётся. Помимо больших смерчей генерируются и смерчи, как поверх турбулизаторов, так и перед турбулизаторами; с этими смерчами объединяются большие смерчи.

У выступов треугольных трансверсальных профилей деформация крупных набегающих смерчей имеет место даже и без генерирования второстепенных смерчей поверх выступов, каковые имеют место у выступов квадратных трансверсальных профилей, но из-за того, что смерчи как бы «разрубаются» рёбрами треугольников надвое и треугольный выступ обтекается со значительным забросом главных смерчей в ядра течений (рис.5).

Смерчи вторичного характера при турбулизаторах треугольного трансверсального профиля генерируются непосредственно на поверхностной грани у треугольников. Размеры вихреобразований вторичного характера, как видно на рис.5, для выступов квадратного поперечного профиля определён больше, чем для выступов треугольного поперечного профиля. В исследованиях [17-19] отмечается, что для средних критериев Рейнольдса, т.е. Re находятся в области 10000, забрасывание главного смерча в ядра потоков с турбулизаторами в виде треугольников сильнее, чем с турбулизаторами в виде квадратов.

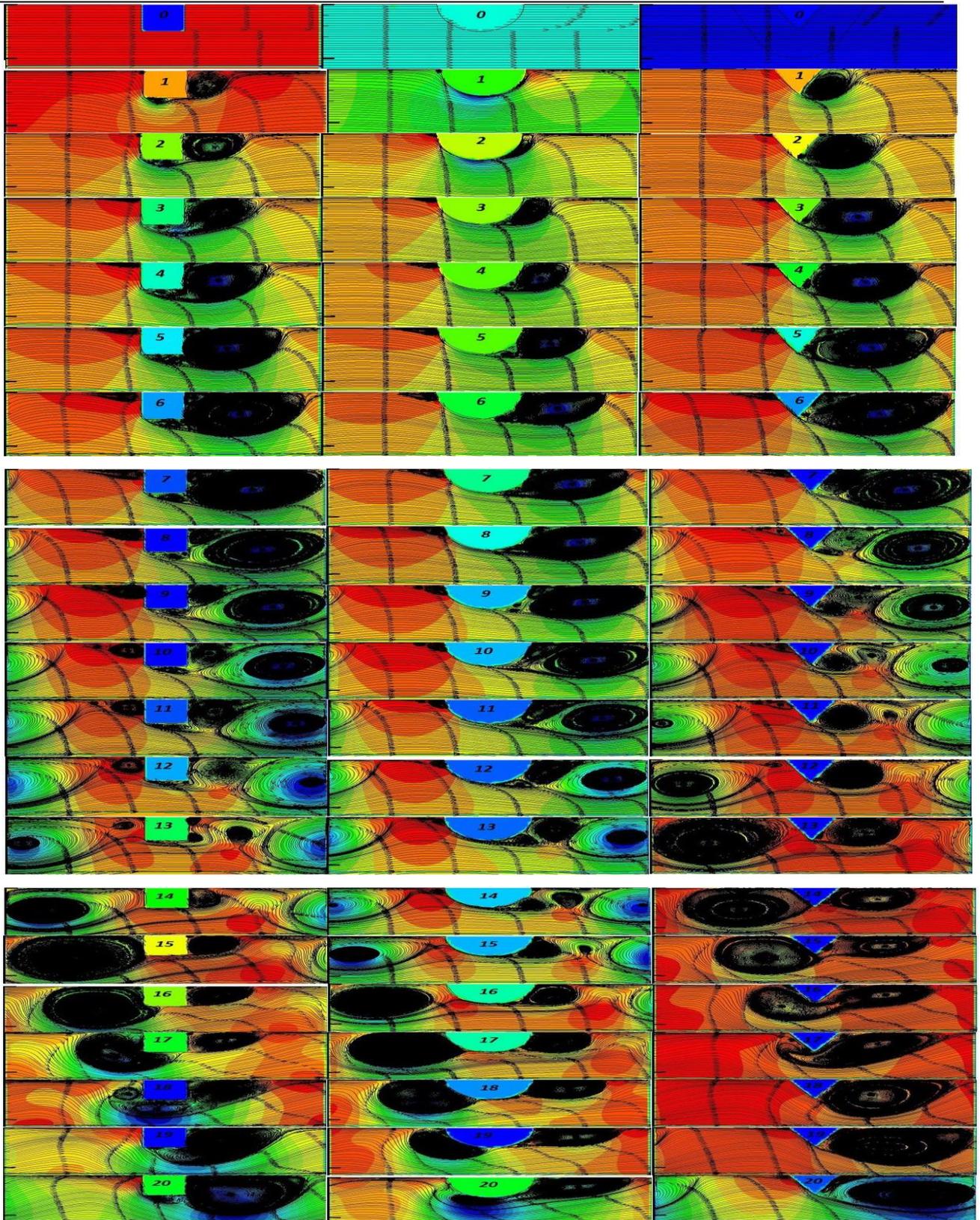


Рис. 5. Расчётная картина визуализирования динамики смерчевых композиций для нестационарного течения воздушного теплоносителя в трубе с выступами квадратных, полукруглых, треугольных трансверсальных профилей для $d/D = 9/10$; $t/h = 7$ или $t/D = 7/20$, $Re = 170000$ для синхронных временных моментов

Fig. 5. Calculated picture of visualizing the dynamics of tornado compositions for an unsteady flow of an air coolant in a pipe with protrusions of square, semicircular, triangular transverse profiles for $d / D = 9/10$; $t/h = 7$ or $t/D = 7/20$, $Re = 170,000$ for synchronous times

Для увеличенных критериев Рейнольдса, т.е. Re находятся в области 100000, для турбулизатора в виде квадрата забрасывание главного смерча в ядра потоков оказывается большим, чем у турбулизатора в виде треугольника непосредственно за счёт зарождения вторичных смерчей над турбулизаторами в виде квадратов.

Последний вывод обосновывает увеличение уровня гидравлических сопротивлений в каналах с турбулизатором в виде квадрата.

У выступов полукруглых трансверсальных профильных сечений деформация больших набегающих смерчей осуществляется с определённо меньшим уровнем, чем у других профилей. Забрасывание главных смерчей в ядра потоков тоже ощутимо слабее в сравнении выступами квадратных и треугольных трансверсальных профилей (рис.5). Второстепенные смерчи у выступов полукруглого поперечного профиля возникают с определённо меньшими размерами, чем у выступов с квадратными и треугольными поперечными профилями; они генерируются на кривой линии полуокружности (рис.5) полукруглого турбулизатора.

Вышеуказанное позволяет сделать вывод о снижении уровня гидравлических сопротивлений в каналах с турбулизаторами с полукруглыми поперечными профилями относительно каналов с треугольными и квадратными поперечными профилями при других эквивалентных параметрах.

Смерчеобразования нестационарного характера очень хорошо коррелируют с соответствующими расчётами стационарного характера, которые были проделаны до настоящего времени для выступов полукруглых, треугольных, квадратных трансверсальных профилей в исследованиях [1-4, 7-12, 15], что видно на рис.5. В этом отношении следует резюмировать, что расчётные композиции смерчей при стационарных постановках в каналах с выступами вышеупомянутых трансверсальных профилей являются своеобразными математическими ожиданиями вычисленных смерчевых композиций при нестационарных постановках.

Представленная на рис.5 расчётная теоретическая информация в значительной степени сочетается с вышепредставленной опытной информацией (рис.3, 4) [5, 6], что подтверждает использованную теорию математического моделирования и обосновывает необходимость её применения для решения сходных задач интенсифицированной теплоотдачи. Определённые незначительные различия объясняются исследованием в теоретическом расчёте гораздо широкого и общего случая при течении теплоносителя, чем это было сделано в опытном исследовании [5, 6].

Композиции изменяющихся во времени смерчей в каналах с выступами в форме квадрата или прямоугольника представляются максимально достойными внимания с точки зрения математических моделирований, ввиду того, что в процессе обтекания выступов с достаточно плавным очертанием [5, 6], как до выступов, так и после выступов двумерные смерчи могут и не генерироваться.

Представленная расчётная информация по параметрам потока и теплоотдаче, переменных по времени, для каналов с выступами, позволяет сделать следующий вывод: сформированные смерчевые композиции, к примеру, зоны отрывов, представляют собой энергоэффективное средство для вынужденного турбулирования течений.

Вырабатывание турбулентностей, которое в значительной степени превосходило бы её диссипацию, реализуется, как правило, на удалённых границах смерчевых композиций, на которых градиенты скоростей и напряжения турбулентности максимизированы; последние явления могут происходить одновременным образом.

В генерируемых до выступов и за выступами с острыми кромками (например, прямоугольных, в частности, квадратных, треугольных) сильных смерчах диссипирование турбулентных энергий соразмерно или даже выше выработок турбулентностей, за исключением случаев верхних границ, что детерминирует увеличение гидросопротивления в канале. Следовательно, возникает необходимость перехода, если

это возможно, к выступам округлённых очертаний, например: полукруглого или сегментного поперечного профиля, на которых или не порождаются двумерные отрывные зоны, или имеет место сочетание трёхмерных смерчевых композиций с достаточно малыми зонами отрыва в пространстве промеж выступов. На высотах верхних границ выступов реализуются максимальные значения выработок турбулентностей за выступами сглаженных очертаний.

Вышепредставленное позволяет резюмировать, что превышающая диссипации выработки турбулентностей для выступов острых профилей - квадратный профиль, треугольный профиль - и скруглённых профилей - полукруглый профиль, сегментный профиль - обеспечивается с кардинально различными гидравлическими потерями.

У каналов с выступами скруглённых профилей, например у полукруглых, коэффициенты гидравлических сопротивлений гораздо меньше, чем у каналов с выступами с острыми профилями, например, у треугольных или у квадратных, прямоугольных.

Выступы скруглённых очертаний характеризуются меньшими гидрпотерями по той причине, что в них вырабатывается организованная структура, интенсифицирующая теплоотдачу, с 3-х-мерными смерчами, которые ориентированы аксиально потоку, которая располагается близко к стенке канала.

Вычисленная на базе низкорейнольдсовой методики информация относительно нестационарных интенсифицированных характеристик потоков и теплоотдачи в каналах с выступами треугольных, полукруглых, квадратных трансверсальных профилей полностью согласуется [5, 6] с физическому представлению протекающего в канале явления теплообмена.

Проделанное в настоящей научной статье результативное моделирование потока и теплоотдачи, переменных во времени, в каналах с выступами разнообразных трансверсальных профилей на основании низкорейнольдсовых ментеровских моделей обосновывает их использование в будущем для аналогичных моделирований в широких диапазонах режима течений теплоносителей, а также размерных параметров труб с выступами.

Вывод. Произведено моделирование смерчевых композиций, зависящих от времени, в каналах с трансверсальными профилями в виде квадрата, треугольника и полукруга, что максимально информативно в плане изучения турбулизованных течений и теплообмена, возникающих при средних критериях Рейнольдса на базе компьютерной многоблочной технологии при использовании решения конечно-объёмными факторизованными способами (ФКОМ-ами) рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений.

Рассмотрению были подвергнуты выступы: квадратных трансверсальных профилей, в которых смерчеобразования наиболее проявлены, а побочные смерчи воздействуют на поток максимальным образом; треугольных трансверсальных профилей, где смерчеобразования проявляются не так сильно, а побочные смерчи влияют на основной поток слабее, чем при квадратных выступах; полукруглых трансверсальных профилей, в которых набегающий главный смерч перемещается по потоку с генерированием ограниченных побочных смерчей.

Полученная в статье расчётная информация в высокой степени коррелирует с имеющимися опытными данными, что указывает на верификацию задействованного в статье математического моделирования.

Библиографический список:

1. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. — М.:

МЭИ, 2003. — Т.1. — С. 57—60.

2. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. — 2004. — Т. 11. — № 2. — С. 28—35.

3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43. — № 2. — С. 223—230.

4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. ... докт. техн. наук. — М.: МАИ, 2005. — 632 с.

5. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. — М.: Машиностроение, 1972. — 220 с.

6. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 408 с.

7. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. — 405 с.

8. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 290 с.

9. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. — М.: МГАКХиС, 2010. — 288 с.

10. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том IV. Специальные аспекты математического моделирования гидрогазодинамики, теплообмена, а также теплопередачи в теплообменных аппаратах с интенсифицированным теплообменом. — М.: МГАКХиС, 2011. — 343 с.

11. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. — 2011. — № 4. — С. 64—66.

12. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. — 2011. — № 12. — С. 4—15.

13. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев, А.И.Леонтьев. — СПб: Судостроение, 2005. — 398 с.

14. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow. Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4. — New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. — pp. 425—432.

15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока полукруглого и квадратного поперечного сечения // Отраслевые аспекты технических наук. — 2012. — № 9. — С. 11—30.

16. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2 / Ю.В.Вилемас, Г.И.Воронин, Б.В.Дзюбенко и др.; Под ред. А.А. Жукаускаускаса и Э.К. Калинина. — Вильнюс: Москслас, 1988. — 188 с.

17. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. — 2013. — № 12. — С. 9—15.

18. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2014. — № 38. — С. 16—31.

19. Лобанов И.Е. Теория динамики вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Научное обозрение. — 2015. — № 22. — С. 226—237.

References:

1. Dreitzer G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: proceedings of the XIV of the

- School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of academician A. I. Leontiev. M.: MPEI, 2003;1: 57–60. (In Russ)
2. Dreitzer G. A., Isaev S. A., Lobanov I. E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions. *Vestnik MAI*. 2004;11 (2): 28–35. (In Russ)
 3. Dreitzer G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulators. *Thermophysics of high temperatures*. 2005; 43 (2): 223–230. (In Russ)
 4. Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels: Diss. ... doct. technical sciences. – Moscow: MAI, 2005: 632. . (In Russ)
 5. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. – M.: *Mashinostroenie*, 1972: 220. (In Russ)
 6. Effective heat transfer surfaces / E.K.Kalinin, G.A.Dreitzer, I.Z. Kopp et al. M.: *Energoatomizdat*, 1998; 408. (In Russ)
 7. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using basic analytical and numerical methods. – M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009; 405. (In Russ)
 8. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume II. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using non-basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2010; 290. (In Russ)
 9. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat transfer during turbulent flow in channels using multilayer, super-multilayer and compound models of a turbulent boundary layer. M.: *MGAKHiS*, 2010; 288. (In Russ)
 10. Lobanov I.E., Stein L.M. Promising heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat exchange for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume IV. Special aspects of mathematical modeling of hydro-gas dynamics, heat transfer, and heat transfer in heat exchangers with intensified heat exchange. M.: *MGAKHiS*, 2011; 343. (In Russ)
 11. Lobanov I.E. Theoretical study of the structure of vortex zones between periodic, superficially located turbulators of a rectangular cross-section flow. *News of universities. Aviation equipment*. 2011; 4: 64–66. (In Russ)
 12. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and kinetic energy components of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. *Branch aspects of technical sciences*. 2011; 12: 4–15. (In Russ)
 13. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages / Yu.A.Bystrov, S.A.Isaev, H.A.Kudryavtsev, A.I.Leontiev. – St. Petersburg: Shipbuilding, 2005; 398. (In Russ)
 14. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4. New York, Wellington (UK): *Begell House Inc.*, 2003; 425–432.
 15. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the structure of vortex zones between periodic surface-located turbulators of semicircular and square cross-section flow // Branch aspects of technical sciences. 2012; 9: 11–30.
 16. Intensification of heat exchange. Success of heat transfer, 2 / Yu.V.Vilemas, G.I.Voronin, B.V.Dzyubenko, etc.; Edited by A.A. Zhukauskas and E.K. Kalinin. Vilnius: *Moskklas*, 1988; 188.
 17. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the dynamics of the development of vortex structures in pipes with turbulators. *Moscow Scientific Review*. 2013;12: 9–15.
 18. Lobanov I.E. Mathematical modeling of the dynamics of the development of vortex structures in pipes with turbulators. *Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering*. 2014;38:16–31(In Russ).
 19. Lobanov I.E. Theory of dynamics of vortex structures in pipes with turbulators. *Scientific review*. 2015; 22: 226–237 (In Russ).

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, e-mail: llobbaannooff@live.ru

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, PNIL-204 MA, e-mail: llobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 29.08.2021.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.09.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 11.09.2021.