

Научная статья

УДК 532.542.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15406>

СТРУКТУРА ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ С ЛОКАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ В ОБЛАСТИ РАЗВЕТВЛЕНИЯ КАНАЛА КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Я. А. Гатаулин¹ ✉, Е. М. Смирнов¹,

В. М. Молочников^{2,3}, А. Н. Михеев³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия;

³ Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия
✉ yakov_gataulin@mail.ru

Аннотация. Статья представляет результаты расчетно-экспериментального исследования течения с локальной турбулентностью в области разветвления канала круглого сечения, при входном числе Рейнольдса $Re = 1475$ и равном распределении расхода по двум ветвям. Численное решение задачи получено методом моделирования крупных вихрей (LES) по динамической модели Джермано – Лилли для оценки подсеточной вязкости. Эксперимент выполнен с использованием метода SIV. Находящиеся в согласии расчетные и опытные данные показывают, что непосредственно в области разветвления, как в прямом, так и в боковом каналах, в потоке выделяются зона струйного течения и рециркуляционная зона. Турбулентные напряжения значительны по величине лишь на участке длиной около четырех калибров. Вниз по потоку течение в обоих каналах реламинизируется.

Ключевые слова: разветвление кровотока, локальная турбулентность, метод моделирования крупных вихрей, SIV-измерение

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-65-47018.

Для цитирования: Гатаулин Я. А., Смирнов Е. М., Молочников В. М., Михеев А. Н. Структура трехмерного течения с локальной турбулентностью в области разветвления канала круглого сечения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 4. С. 81–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15406>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15406>

THE STRUCTURE OF A 3D FLOW WITH LOCAL TURBULENCE IN THE BRANCHING JUNCTURE OF A CIRCULAR-SECTION CHANNEL

Ya. A. Gataulin¹ ✉, E. M. Smirnov¹,

V. M. Molochnikov^{2,3}, A. N. Mikheev³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia;

³ FRC "Kazan Scientific Center of RAS", Kazan, Russia

✉ yakov_gataulin@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a computational and experimental studies of a flow with local turbulence in the branching juncture of a channel with a round cross-section for the inlet Reynolds number $Re = 1475$ and for equal flow rates in two branches. The numerical solution of the problem has been obtained by the LES technique using the Germano – Lilli dynamic model for estimating the subgrid viscosity. The experiment used the SIV method. The calculated and experimental data in agreement showed that a jet-flow zone and a recirculation one were distinguished in the flow, directly in the branching juncture both in the forward and in the side channels. Turbulent stresses were significant in magnitude only in the channel section about four gauges long. Downstream, the flow in both channels was relaminarized.

Keywords: blood flow branching, local turbulence, large eddy simulation, SIV measurement

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 20-65-47018).

For citation: Gataulin Ya. A., Smirnov E. M., Molochnikov V. M., Mikheev A. N., The structure of a 3D flow with local turbulence in the branching juncture of a circular-section channel, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 15 (4) (2022) 81–94. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Трубопроводные сети с разветвлениями широко используются для транспортировки жидкостей и газов в инженерных приложениях, например, в двигателях внутреннего сгорания, компрессорах, гидротурбинах и т. п. Типичные размеры и режимы работы перечисленных технических устройств с высокими значениями числа Рейнольдса определяют выраженный турбулентный характер течения на всем протяжении трубопроводной сети с разветвлениями.

Несколько иная ситуация возникает при обращении к вопросам гемодинамики сердечно-сосудистой системы человека. Течение крови в большинстве магистральных сосудов (артерий) характеризуется умеренными числами Рейнольдса (порядка 10^3), что порождает многоплановость проблемы развития турбулентных образований на участках сосудистого русла с резкими изменениями проходного сечения сосуда или же направления кровотока, включая случаи его разветвления.

Естественные бифуркации (разветвления) артерий являются типичным местом повышенного риска для возникновения и развития атеросклероза, одного из наиболее распространенных заболеваний, которое может привести к ишемическому инсульту, длительной нетрудоспособности человека или даже летальному исходу. Все это пробуждает интерес к детальному изучению трехмерной динамики кровотока в разветвленных артериях [1 – 3]. Область разветвления сосудистого русла иногда искусственно создается при хирургических операциях, которые ставят целью установку шунта (протеза) для восстановления кровотока по артерии, локально перекрытой вследствие развития патологии. При этом в анастомозах конец-в-бок (соединение протеза и сосуда) со временем может развиваться гиперплазия неоинтимы – чрезмерный рост тканей внутреннего слоя сосудов (интимы) в области шва, приводящий к зарастанию протеза.

Чаще всего основной причиной развития атеросклеротических бляшек и роста толщины неоинтимы считается низкое напряжение пристеночного сдвига. На эту взаимосвязь указывают результаты многочисленных исследований. Помимо самой величины сдвиговых напряжений, на рост внутреннего слоя стенки пораженного сосуда существенное влияние оказывает динамика изменения этого параметра: высокие градиенты напряжения трения на стенке во времени и пространстве коррелируют с ускоренным ростом бляшек и толщины интимы [4 – 6].

Возникновение аномальных (высоких или низких) значений поверхностного трения в области разветвления сосудов обусловлено сложной трехмерной динамикой течения. Локальная турбулизация потока в области разветвления сосуда может оказывать влияние на такие важные параметры, как положение и протяженность области рециркуляции, интенсивность пульсаций параметров кровотока, в том числе пристеночного напряжения сдвига. Это, в свою очередь, влияет на биохимические процессы в эндотелиальных клетках и может приводить к интенсивному росту интимы и, как следствие, зарастанию протеза.

В литературе имеется большое число работ, преимущественно численного характера, по исследованию вихревой структуры течения и его перехода к турбулентности (или же образования областей локальной турбулентности) в моделях кровеносных сосудов со стенозом [7 – 15]. В противоположность этому, практически отсутствуют публикации, посвященные систематическому изучению вопросов развития локальной турбулентности в областях разветвлений каналов, равно как и особенностей трехмерной структуры турбулизованного течения в этих областях при числах Рейнольдса порядка 10^3 .

Упомянем, однако, относительно недавнюю работу [16], в которой представлены результаты численного моделирования структуры полностью развитого турбулентного течения (при числе Рейнольдса порядка 10^6) и потерь давления на участке проточного тракта, где от основного канала круглого сечения ответвляется трубка несколько меньшего диаметра.

Настоящая расчетно-экспериментальная работа нацелена на прояснение картины динамики отрывного потока и возникновения турбулентности при протекании крови в анастомозах сосудов по типу конец-в-бок.

В связи с заявленной целью представлены методы и результаты экспериментального исследования, а также численного моделирования в среднем стационарного течения в канале с разветвлением, при числе Рейнольдса $Re = 1475$, близком к максимальному значению этого числа (по статистическим данным) для кровотока в бедренной артерии человека за период сердечных сокращений.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования выполнялись на специальной установке, схема которой показана на рис. 1. Движение жидкости в рабочем участке установки обеспечивается за счет статического напора, создаваемого напорным баком 1, установленным на жесткой раме. Постоянный уровень жидкости в этом баке (постоянный статический напор) поддерживается при помощи устройства перелива 2 и насоса 9, который перекачивает жидкость в напорный бак из бака-хранилища 7. Жидкость из напорного бака поступает в рабочий участок 10 через дозатор 3 с набором сопел различного проходного сечения. Требуемое значение расхода рабочей жидкости устанавливается через включение в работу определенного набора сопел. Рабочий участок имеет форму канала с ответвлением. Соотношение расходов жидкости, протекающей через основной участок и ответвление задается расходными шайбами 13, которые установлены в сливных магистралях 12. Соответствующие значения расхода контролируются прямыми измерениями веса жидкости, поступающей за требуемый промежуток времени через сливные магистрали в измерительные емкости, установленные на тензометрических весах 14.

Экспериментальная установка позволяет проводить исследования как для стационарного, так и для пульсирующего режимов течения. Создание пульсаций расхода в рабочем участке установки обеспечивается возвратно-поступательным движением поршня 4, приводимого в движение профилированным кулачком 5, который вращается электродвигателем 6 с частотным преобразователем.

Установка снабжена системой измерений мгновенных двумерных векторных полей скорости потока (*англ.* Smoke Image Velocimetry (SIV)) [17]. В качестве трассеров используются полиамидные частицы диаметром 5 мкм. Более высокая концентрация трассеров, по сравнению с методом цифровой трассерной визуализации потоков (*англ.* Particle Image Velocimetry (PIV)), способствует увеличению пространственного разрешения и снижению шумов измерений.

Рабочий участок установки представляет собой гладкую трубу с ответвлением, установленным под углом 60° (рис. 2). Внутренний диаметр основной трубы и ответвления,

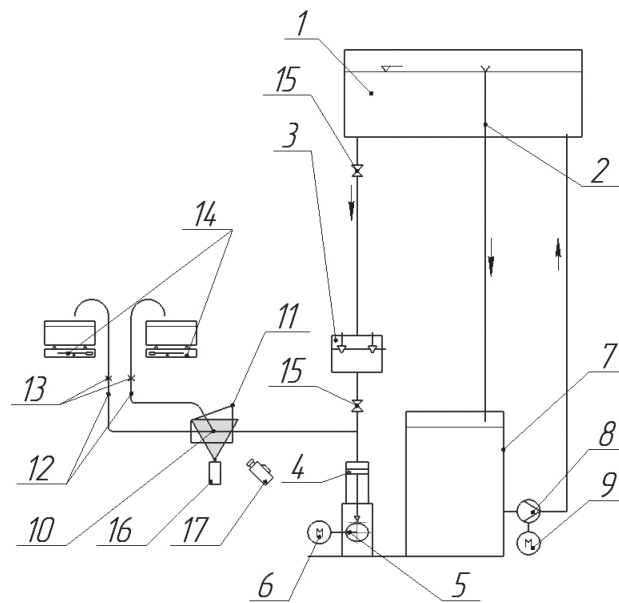


Рис. 1. Схема установки для исследования течения жидкости в канале с боковым разветвлением: 1 – напорный бак; 2 – система перелива; 3 – дозатор; 4 – поршень; 5 – кулачок; 6 – электродвигатель с частотным регулятором; 7 – бак-хранилище; 8 – насос; 9 – электропривод; 10 – рабочий участок; 11 – бокс; 12 – сливные магистрали; 13 – расходные шайбы; 14 – измерительные емкости с тензометрическими весами; 15 – запорные вентили; 16 – лазер; 17 – скоростная камера

выполненных из прозрачного поликарбоната, составляет $D = 17$ мм. В качестве рабочей жидкости используется водный раствор глицерина, массовая доля которого составляла 56,3 %. Для снижения погрешности результатов измерений, вызванной различием коэффициентов преломления рабочей жидкости и воздуха, рабочий участок размещался в заполненном глицерином боксе 11, выполненном в форме прямоугольного параллелепипеда.

Съемки картины течения методом SIV проводили в плоскости симметрии рабочего участка установки скоростной камерой Эверкам 2000-4М в световом ноже, создаваемом лазером непрерывного действия SSP-ST-532-NB-5-5-LED-VAC (длина волны излучения – 532 нм (ярко-зеленый цвет)). Камеру и лазер устанавливали на координатном устройстве, обеспечивающем их перемещение относительно рабочего участка.

Температура рабочей жидкости в опытах изменялась не более, чем на $0,5^\circ$, и ее контролировали при помощи аттестованного датчика температуры ТПТУ-1-1-100-142/0...100-0.25. Значение вязкости жидкости в условиях экспериментов составляло $\nu = 7,85 \cdot 10^{-6}$ м²/с, и его контролировали перед каждой серией опытов прямыми измерениями с помощью ви-

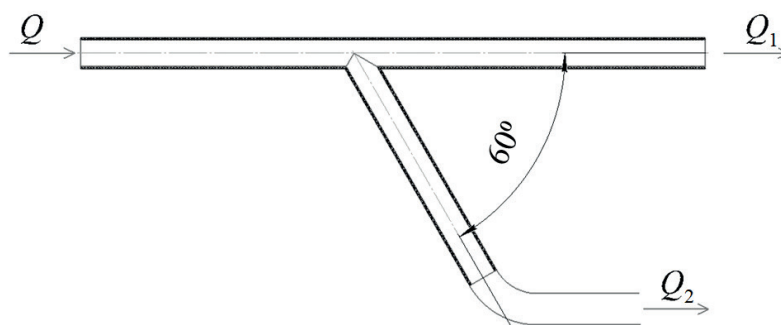


Рис. 2. Схема рабочего участка экспериментальной установки (см. поз. 10 на рис. 1): Q , Q_1 , Q_2 – расходы через основной канал и ответвления

скозиметра капиллярного ВПЖ (вискозиметр для прозрачных жидкостей), обладающего пределом погрешности 0,35 %.

Эксперименты выполнялись в условиях стационарного в среднем потока рабочей жидкости при числе Рейнольдса $Re = 1475$, рассчитанном по среднерасходной входной скорости U_b и диаметру D . Соотношение расходов через основной канал и отвления составляло $Q_1/Q = Q_2/Q = 0,5$.

Аспекты численного моделирования

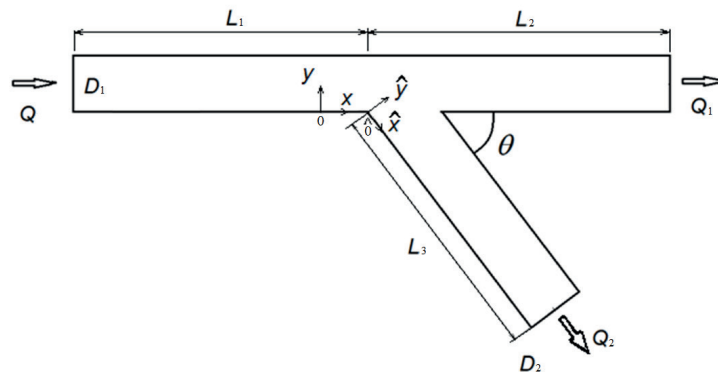


Рис. 3. Схема расчетной области при численном моделировании; показаны геометрия области и две введенные системы координат; D_i — диаметры каналов, $L_1 = L_2 = L_3 = 10D$

Геометрия расчетной области (рис. 3) при численном моделировании полностью соответствовала рабочему участку экспериментальной установки. На рис. 3 показаны две введенные системы координат. Начало декартовой системы x, y, z для основного канала располагается в плоскости симметрии, на стенке с примыкающим боковым каналом, на расстоянии, равном одному диаметру D канала (одному калибру) от точки разветвления (вершины тупого угла); ось x направлена вдоль потока. Начало декартовой системы координат $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, введенной для бокового канала, располагается в вершине тупого угла (в начале разветвления); ось \hat{x} направлена вдоль внешней стенки бокового канала, а ось \hat{y} — в сторону внутренней стенки (образует с внутренней стенкой основного канала острый угол). Расчетная область включала входной участок протяженностью L_1 , равной $10D$, участок основного (прямого) канала после разветвления длиной $L_2 = 10D$ и боковой канал с длиной внешней стенки L_3 , также равной $10D$. Выбранные длины L_2 и L_3 достаточны для отсутствия какого-либо влияния искусственных граничных условий, накладываемых на выходах из расчетной области.

Численное моделирование исследуемого течения несжимаемой вязкой жидкости с постоянным коэффициентом вязкости выполняли по методу моделирования крупных вихрей (англ. Large Eddy Simulation (LES)) с применением динамической модели Джермано – Лилли [18, 19]. Расчеты проведены с привлечением гидродинамического «конечно-объемного» кода общего назначения ANSYS CFX, версия 18.2; уравнения гидродинамики в данном коде решаются в размерных величинах.

На входе в расчетную область задавалось распределение скорости, соответствующее профилю Пуазейля для развитого ламинарного течения в круглой трубе. Величина входной среднерасходной скорости U_b выбиралась из условия соответствия эксперименту по числу Рейнольдса $Re = 1475$. На выходе Q_1 (см. рис. 3) задавалось постоянное давление и «мягкие» граничные условия для скорости, на выходе Q_2 — условие заданного расхода (50 % от входного). На стенках ставилось условие прилипания.

Блочная расчетная гексаэдрическая сетка типа O-grid, фрагменты которой иллюстрируются на рис. 4, была построена с использованием программы ICEM CFD. В области разветвления продольный шаг сетки составлял $0,03D$, при этом максимальный поперечный шаг составлял $0,01D$. Общее число элементов сетки составляло около 6,5 млн. При вычислениях для аппроксимации конвективных слагаемых уравнений движения использовали центральную схему второго порядка точности, для производных по времени — трехслойную схему Эйлера. Шаг по времени составлял $0,0053t_s$ (t_s — временной масштаб

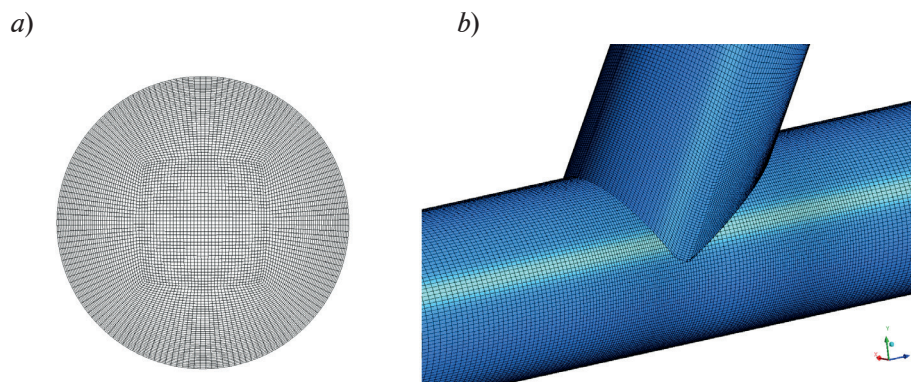


Рис. 4. Расчетные сетки в поперечном сечении (а) и в области разветвления (b)

задачи, $t_s = D/U_s$); такой выбор шага обеспечивал во всей расчетной области локальные значения числа Куранта, меньшие единицы.

Выборка, использованная для получения осредненных характеристик потока, накапливалась за период времени, равный $1050t_s$; предшествующий временной интервал, охватывающий около $600t_s$, был достаточен для выхода на статистически установившийся режим течения, при старте с нулевого поля скорости.

Расчеты проводились на кластере «Политехник – РСК Торнадо» суперкомпьютерного центра «Политехнический» (<http://www.scc.spbstu.ru>). Задача рассчитывалась на 18 двухпроцессорных узлах (Intel(R) Xeon(R) E5 2697v3) и распараллеливалась на 450 ядер; при этом для полного расчета требовалось около недели реального времени (76 тыс. ядерочасов).

Анализ и обсуждение полученных данных

Картины течения, полученные посредством визуализации экспериментальных и расчетных данных, показаны на рис. 5. Расчет и эксперимент дают схожую структуру течения. До разветвления течение ламинарное, далее вниз по потоку происходит потеря устойчивости сдвиговых слоев и последующая турбулизация течения. Высокоинтенсивные струи распространяются вдоль внутренних стенок разветвления (образующих острый угол), зоны турбулизованного течения примыкают к противоположным (внешним) стенкам.

Условимся осредненную по времени продольную (осевую) компоненту скорости и ее среднеквадратичную пульсацию в области основного канала обозначать как U и u_{rms} , а аналогичные величины в области бокового канала – теми же символами, но с крышечкой, т. е. как \hat{U} , \hat{u}_{rms} .

На рис. 6 показана изоповерхность Q -критерия [20], окрашенная в соответствии с локальными значениями среднеквадратичных пульсаций продольной скорости и дающая наглядное представление о наличии в области разветвления локализованных областей турбулизованного течения, заполненных разномасштабными вихревыми структурами.

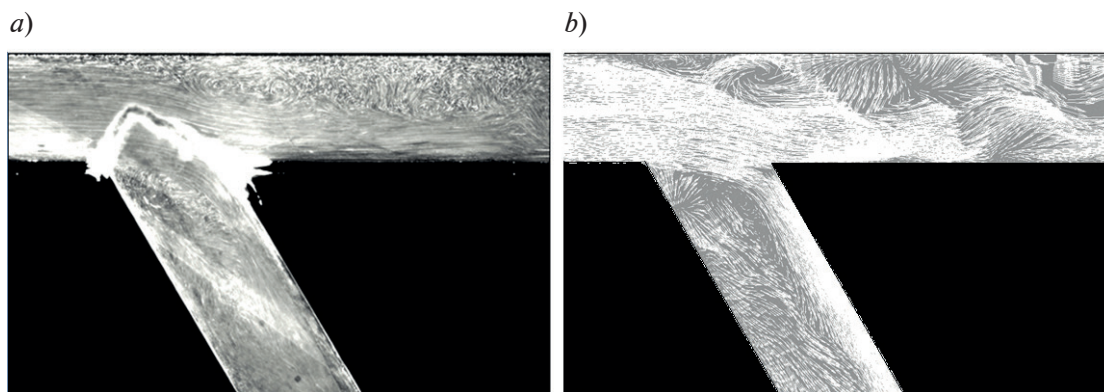


Рис. 5. Визуализация течения в плоскости симметрии канала: а – результат SIV-измерений, б – расчетное поле вектора скорости



Рис. 6. Изоповерхность Q -критерия, окрашенная в соответствии со значениями среднеквадратичных пульсаций продольной скорости в двух ветвях канала

Измерения осредненной по времени продольной скорости и ее пульсаций выполняли в средней плоскости (плоскости симметрии) в сечениях рабочего участка со следующими нормированными координатами сечений:

для прямого канала

$$x/D = 0,00; 1,00; 1,58; 1,77; 2,17; 2,56; 3,15; 3,55; 4,34; 4,93;$$

для бокового канала

$$\hat{x}/D = 0,00; 0,20; 0,39; 0,59; 0,79; 1,38; 2,17; 2,76; 3,35.$$

На основе совокупности измеренных профилей продольной скорости и ее пульсаций посредством процедуры интерполяции в программе Tecplot360 были построены двумерные поля данных величин (рис. 7) в сопоставлении с расчетными данными.

Сравнение расчетных и экспериментальных полей продольной компоненты скорости (рис. 7) свидетельствует о хорошем качественном совпадении. За разветвлением можно выделить две основные области течения: высокоскоростные струи у внутренних стенок и рециркуляционные области у внешних стенок области разветвления. Однако обратное течение в зонах рециркуляции в прямом и боковом каналах, по данным расчетов, более интенсивное, в результате расчетная зона рециркуляции в боковом канале заметно больше экспериментальной.

После разветвления у внутренней стенки основного канала формируются высокоскоростная струя, максимальная скорость в которой почти в 1,5 раза превышает среднерасходную скорость U_b в канале до разветвления и, соответственно, почти в 3 раза превышает местную среднерасходную скорость, равную $0,5U_b$ с учетом отвода половины расхода в боковой канал. Вниз по потоку струя быстро теряет свою интенсивность. Продольный размер рециркуляционной области в прямом канале, по результатам расчетов и измерений, составляет примерно 3,2 и 4,0 калибра канала, соответственно.

В сдвиговых слоях, которые формируются на границе струи и низкоскоростной области, наблюдаются значительные поперечные градиенты скорости потока. В этих условиях сдвиговые слои теряют устойчивость. По мере развития нелинейных гидродинамических процессов максимальное значение пульсаций продольной компоненты скорости растет и в расчете достигает значений $u_{rms}/U_b \approx 0,45$ для прямого канала и $\hat{u}_{rms}/U_b \approx 0,20$ для бокового канала (рис. 7, c, d). В основном канале, при $x/D > 5$, распределение интенсивности пульсаций становится близким к равномерному, а в боковом канале относительно долго сохраняется картина с разделением поля \hat{u}_{rms} на два слоя с разным уровнем интенсивности пульсаций. Экспериментальные данные указывают на те же тенденции, однако максимальный уровень пульсаций продольной скорости в прямом канале примерно на 30 % ниже.

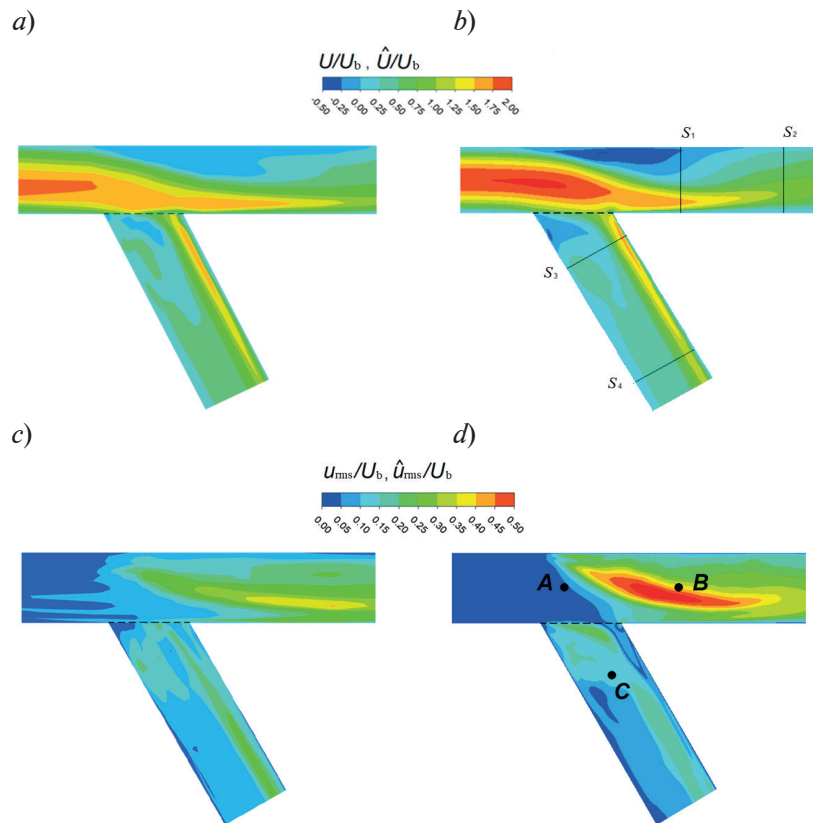


Рис. 7. Поля осредненной по времени продольной компоненты скорости (a, b) и среднеквадратичных значений пульсации этой компоненты (c, d):
a, c – эксперимент; b, d – расчет

На рис. 8 приведено сопоставление экспериментальных профилей осредненной продольной скорости с результатами численного моделирования при $x/D = 0,00; 1,58$ и $3,15$ для прямого канала и $\hat{x}/D = 2,76$ для бокового. Результаты измерения продольной скорости потока на расстоянии одного калибра до разветвления (рис. 8, a) показали существенное отличие от профиля для развитого ламинарного течения в круглой трубе (профиль Пуазейля), в то время как по расчетному результату распределение скорости в данном сечении почти не отличается от профиля Пуазейля, заданного в качестве граничного условия на входе в расчетную область. Возможная причина проявившегося в эксперименте отличия профиля скорости на входном участке от профиля Пуазейля заключается в наличии остаточного вторичного (поперечного) течения, исходно возникшего в начале предвключенного прямого канала при прохождении потока через тройник (отсутствовал спрямляющий хонейкомб на входе в этот прямой канал).

Анализ данных на рис. 8 позволяет заключить, что, несмотря на указанное отличие, во входном профиле скорости, ниже по потоку наблюдается в целом удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов (см. рис. 8, b – d).

Ввиду ограниченности экспериментальной информации, далее представлены и обсуждаются только результаты численного моделирования, дающие возможность глубже понять трехмерную структуру изучаемого течения.

На рис. 9 для четырех поперечных сечений ($S_1 - S_4$) модели (показаны сплошной линией на рис. 7, b) представлены поля осредненной продольной скорости с наложенными на них полями векторов поперечной скорости. Здесь также видно, что струи, которые сформировались в основном и боковом каналах, характеризуются относительно высокими локальными скоростями (они в 1,5 раза превышают масштабную скорость U_b). Вместе с тем, течению за разветвлением в обеих ветвях присуще наличие существенного по интенсивности поперечного (вторичного) течения в виде парного вихря (см. рис. 9, a, c). В основном канале вторичное течение ослабевает через два калибра, а затем вместо центральной пары вихрей формируется пара вихрей у боковых стенок с противоположной

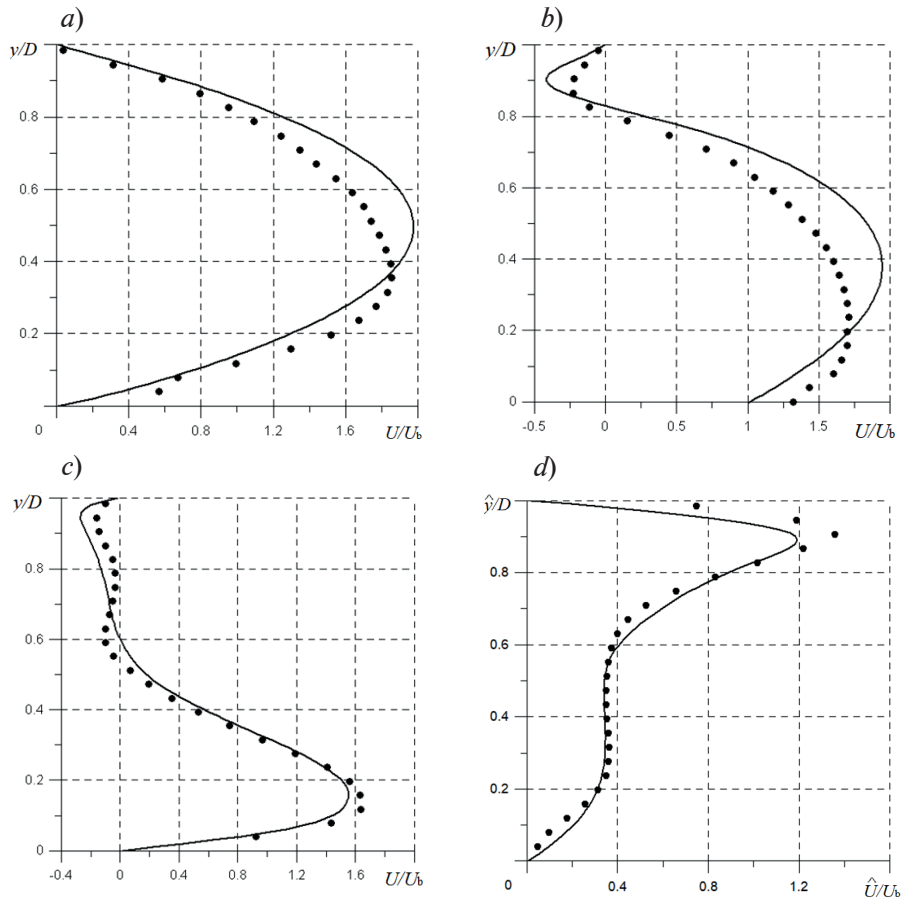


Рис. 8. Сопоставление расчетных (линии) и экспериментальных (точки) профилей осредненной по времени продольной скорости потока в прямом канале при разных значениях нормированных координат сечений x/D ($a - c$), а также в боковом канале при $\hat{x}/D = 2,76$ (d); $x/D = 0,00$ (a), $1,58$ (b), $3,15$ (c)

циркуляцией (см. рис. 9, b). В боковом канале вторичные вихри постепенно затухают по длине канала, направление циркуляции в них сохраняется. Не добавляя соответствующих иллюстраций на рис. 9, отметим также, что на расстоянии менее $10D$ за разветвлением поперечное течение почти полностью вырождается и распределение осредненной продольной скорости вновь приобретает осесимметричный «трубный» вид, с максимумом скорости в центре канала.

На рис. 10 проиллюстрированы временные изменения актуальной продольной скорости в четырех точках: по две на осях основного и бокового каналов (три из них показаны на рис. 7, d). Весьма примечательно, что течение в самом начале области разветвления, в частности около точки пересечения осей основного и бокового каналов, носит квазипериодический характер (см. рис. 10, a) с ведущей безразмерной частотой $Sh = fD/U_b \approx 0,51$. Однако вскоре за разветвлением (рис. 10, b, d) течение характеризуется нерегулярными пульсациями скорости потока, которые вызваны прохождением разномасштабных вихревых структур; последние сформировались в результате локальной турбулизации течения. Далее вниз по потоку амплитуда пульсаций заметно снижается (см. рис. 10, c).

На рис. 11 приведены продольные распределения осредненного по времени коэффициента трения на внешней и внутренней стенках каналов (в плоскости симметрии). Коэффициент трения вычислялся по формуле

$$C_f = \tau_w / (\rho U_b^2 / 2),$$

где τ_w – модуль вектора напряжения трения на стенке.

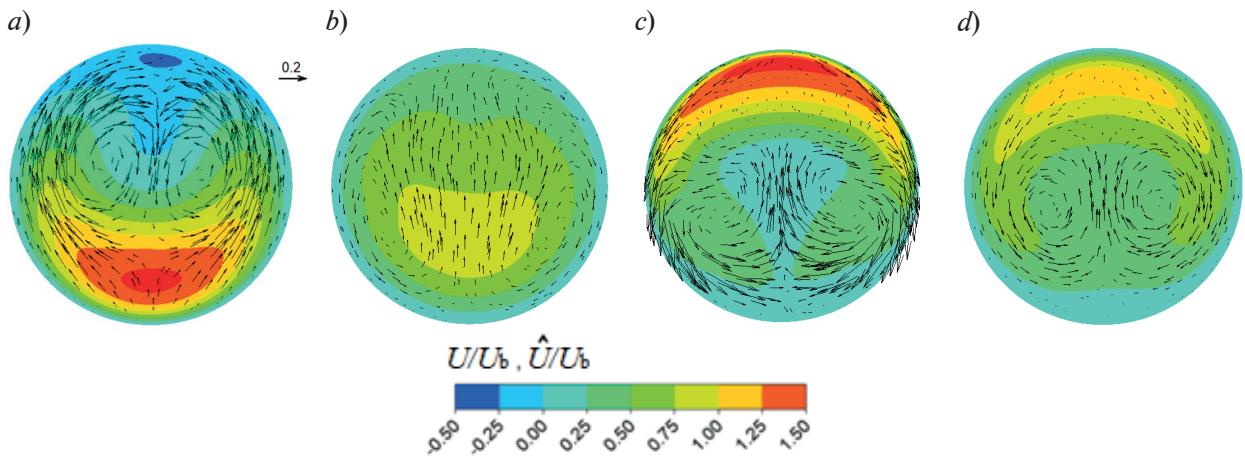


Рис. 9. Осредненные по времени поля продольной скорости с наложенными на них полями векторов поперечной скорости в четырех сечениях модели сосуда: $x/D = 3,15$ (a), $4,65$ (b), $\hat{x}/D = 1$ (c) и 3 (d)

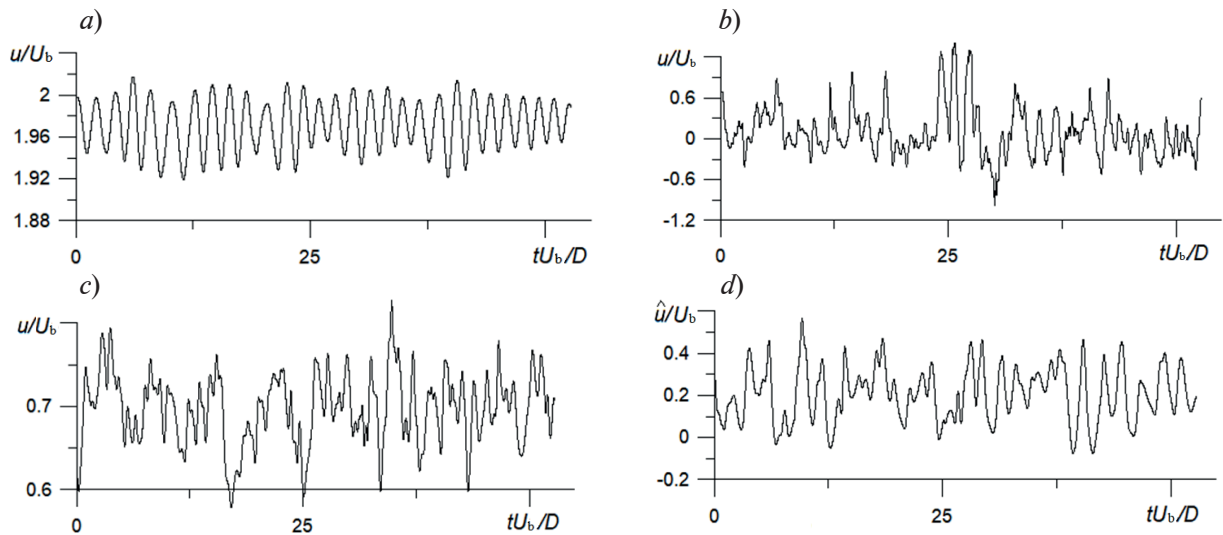


Рис. 10. Изменения во времени актуальной продольной скорости потока в канале с разветвлением, рассчитанные для разных точек (см. рис. 7, d): a – центр разветвления (точка A); b, c – на расстояниях $1,6D$ (точка B) и $10D$ (точка не обозначена) от центра разветвления по оси основного канала; d – на расстоянии $1,4D$ от центра разветвления по оси бокового канала (точка C)

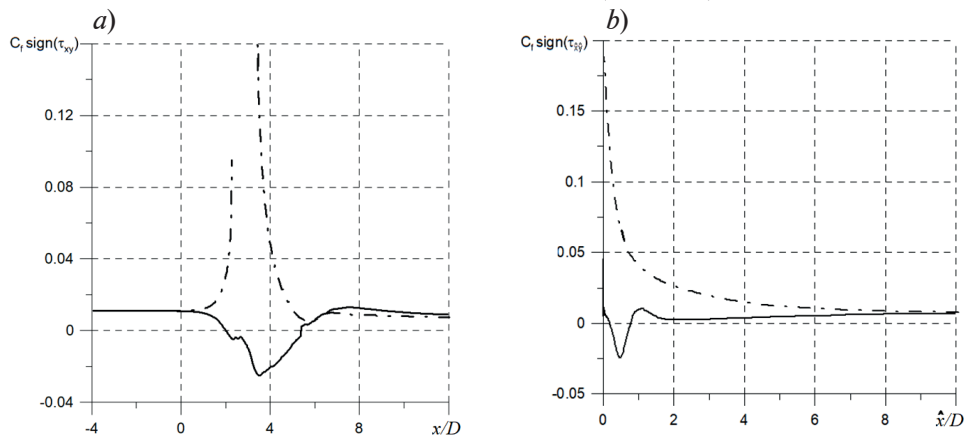


Рис. 11. Продольные изменения осредненного по времени коэффициента трения в основном (a) и боковом (b) каналах; приведены данные для внешней (сплошная линия) и внутренней (штрихпунктир) стенок разветвления



С целью выявления участков обратного течения, значения коэффициента трения, приведенные на графиках, рассчитаны с учетом знака продольных составляющих τ_{xy} и τ_{yx} вектора поверхностного напряжения в основном и боковом каналах.

На внутренних стенках каналов в области разветвления коэффициент трения относительно высок и локально превышает значение 0,011 (примерно в 20 раз), рассчитанное при данном числе Рейнольдса для входного ламинарного течения с распределением скорости в виде профиля Пуазейля.

На внешней стенке прямого канала коэффициент трения сопоставим с приведенным значением, а на внешней стенке бокового канала – в несколько раз меньше (в основном).

В областях возвратного течения максимальные по модулю значения коэффициента трения C_f приблизительно в два раза превосходят таковые на входном участке.

Заключение

Средствами физического эксперимента (техника SIV-измерений) и численного моделирования (метод LES) исследовано стационарное (в среднем) течение в канале круглого сечения с разветвлением, при числе Рейнольдса $Re = 1475$ и равном распределении расхода по двум ветвям. Результаты проведенных измерений и расчетов согласуются между собой и выявили следующие основные особенности исследуемого течения.

Входящее в область разветвления ламинарное течение теряет устойчивость, в результате чего в этой области быстро запускаются процессы турбулизации потока, с образованием разномасштабных вихревых структур, целиком заполняющих поперечное сечение как основного, так и бокового каналов. Быстрая турбулизация течения обусловлена формированием отрывных рециркуляционных зон и высокоградиентных слоев смещения на их границах. Турбулентные напряжения значительны по величине лишь на участке протяженностью около $4D$ (D – диаметр канала). Вниз по потоку течение в обоих каналах реламинаризируется.

Осредненное по времени течение в каждой из ветвей характеризуется высокой неоднородностью продольного поля продольной скорости и наличием поперечного движения в виде пары вихрей, весьма интенсивных на первых нескольких калибрах. Поле коэффициента трения на стенке в области разветвления также характеризуется высокой неоднородностью, с наличием участков, где значения этого коэффициента либо на порядок выше значения, рассчитанного для входного потока, либо наоборот, в несколько раз ниже.

Комбинированное применение методов LES и SIV, несомненно, должно повысить качество предсказания характеристик локально турбулентного течения крови, развивающегося в анастомозах сосудов по типу конец-в-бок, а значит, получать более достоверные результаты, представляющие интерес для биомедицины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schirmer C. M., Malek A. M. Computational fluid dynamic characterization of carotid bifurcation stenosis in patient-based geometries // *Brain and Behavior*. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 42–52.
2. Filardi V. Carotid artery stenosis near a bifurcation investigated by fluid dynamic analyses // *Neuroradiology Journal*. 2013. Vol. 26. No. 4. Pp. 439–453.
3. Li C.-H., Gao B.-L., Wang Ji.-W., Liu J.-F., Li H., Yang S.-T. Hemodynamic factors affecting carotid sinus atherosclerotic stenosis // *World Neurosurgery*. 2019. Vol. 121. Pp. 262–276.
4. Haruguchi H., Teraoka S. J. Intimal hyperplasia and hemodynamic factors in arterial bypass and arteriovenous grafts: a review // *Artificial Organs*. 2003. Vol. 6. No. 4. Pp. 227–235.
5. McGah P. M., Leotta D. F., Beach K. W., Riley J. J., Aliseda A. A longitudinal study of remodeling in a revised peripheral artery bypass graft using 3D ultrasound imaging and computational hemodynamics // *Journal of Biomechanical Engineering*. 2011. Vol. 133. No. 4. P. 041008 (10p.).
6. Donadoni F., Pichardo-Almarza C., Bartlett M., Dardik A., Homer-Vanniasinkam S., Dnaz-Zuccarini V. Patient-specific, multi-scale modeling of neointimal hyperplasia in vein grafts // *Frontiers in Physiology*. 2017. Vol. 8. 18 April. P. 0022 (10p.).
7. Mittal R., Simmons S. P., Udaykumar H. S. Application of large-eddy simulation to the study

of pulsatile flow in a modelled arteria stenosis // *Journal of Biomechanical Engineering*. 2001. Vol. 123. No. 4. Pp. 325–332.

8. **Mittal R., Simmons S. P., Najjar F.** Numerical study of pulsatile flow in a constricted channel // *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 485. 25 May. Pp. 337–378.

9. **Sherwin S. J., Blackburn H. M.** Three-dimensional instabilities and transition of steady and pulsatile flows in an axisymmetric stenotic flows // *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 533. 25 June. Pp. 297–327.

10. **Blackburn H. M., Sherwin S. J.** Instability modes and transition of pulsatile stenotic flow: pulse-period dependence // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 573. February. Pp. 57–88.

11. **Varghese S. S., Frankel S. H., Fischer P. F.** Direct numerical simulation of stenotic flows. Part 1. Steady flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 582. 10 July. Pp. 253–280.

12. **Varghese S. S., Frankel S. H., Fischer P. F.** Direct numerical simulation of stenotic flows. Part 2. Pulsatile flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 582. 10 July. Pp. 281–318.

13. **Molla M. M., Paul M. C., Roditi G.** LES of additive and non-additive pulsatile flows in a model arterial stenosis // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2010. Vol. 13. No. 1. Pp. 105–120.

14. **Paul M. C., Molla M. M.** Investigation of physiological pulsatile flow in a model arterial stenosis using large-eddy and direct numerical simulations // *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 36. No. 9. Pp. 4393–4413.

15. **Гатаулин Я. А., Смирнов Е. М.** Численное исследование структуры и локальной турбулизации течения в кровеносном сосуде с односторонним стенозом // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2021. Т. 14. № 1. С. 72–84.

16. **Sukhapure K., Burnsa A., Mahmuda T., Spooner J.** CFD modelling and validation of head losses in pipe bifurcations // 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Pp. 489–494.

17. **Михеев Н. И., Душин Н. С.** Метод измерения динамики векторных полей скорости турбулентного потока по видеосъемке дымовой визуализации // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 6. С. 114–122.

18. **Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H.** A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model // *Physics of Fluids*. 1991. Vol. 3. No. 7. Pp. 1760–1765.

19. **Lilly D. K.** A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method // *Physics of Fluids*. 1992. Vol. 4. No. 3. Pp. 633–635.

20. **Jeong J., Hussain F.** On the identification of a vortex // *Journal of Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 285. 25 February. Pp. 69–94.

REFERENCES

1. **Schirmer C. M., Malek A. M.,** Computational fluid dynamic characterization of carotid bifurcation stenosis in patient-based geometries, *Brain Behav.* 2 (1) (2012) 42–52.

2. **Filardi V.,** Carotid artery stenosis near a bifurcation investigated by fluid dynamic analyses, *Neuroradiol. J.* 26 (4) (2013) 439–453.

3. **Li C-H., Gao B-L., Wang Ji-W., et al.,** Hemodynamic factors affecting carotid sinus atherosclerotic stenosis, *World Neurosurg.* 121 (2019) 262–276.

4. **Haruguchi H., Teraoka S. J.,** Intimal hyperplasia and hemodynamic factors in arterial bypass and arteriovenous grafts: a review, *Artif. Organs.* 6 (4) (2003) 227–235.

5. **McGah P. M., Leotta D. F., Beach K. W., et al.,** A longitudinal study of remodeling in a revised peripheral artery bypass graft using 3D ultrasound imaging and computational hemodynamics, *J. Biomech. Eng.* 133 (4) (2011) 041008.

6. **Donadoni F., Pichardo-Almarza C., Bartlett M., et al.,** Patient-specific, multi-scale modeling of neointimal hyperplasia in vein grafts, *Front. Physiol.* 8 (18 April) (2017) 0022 (10 p.).

7. **Mittal R., Simmons S. P., Udaykumar H. S.,** Application of large-eddy simulation to the study of pulsatile flow in a modelled arteria stenosis, *J. Biomech. Eng.* 123 (4) (2001) 325–332.

8. **Mittal R., Simmons S. P., Najjar F.,** Numerical study of pulsatile flow in a constricted channel, *J. Fluid Mech.* 485 (25 May) (2003) 337–378.

9. **Sherwin S. J., Blackburn H. M.,** Three-dimensional instabilities and transition of steady and pulsatile flows in an axisymmetric stenotic flows, *J. Fluid Mech.* 533 (25 June) (2005) 297–327.

10. **Blackburn H. M., Sherwin S. J.**, Instability modes and transition of pulsatile stenotic flow: pulse-period dependence, *J. Fluid Mech.* 573 (2007) (February) 57–88.
11. **Varghese S. S., Frankel S. H., Fischer P. F.**, Direct numerical simulation of stenotic flows. Part 1. Steady flow, *J. Fluid Mech.* 582 (10 July) (2007) 253–280.
12. **Varghese S. S., Frankel S. H., Fischer P. F.**, Direct numerical simulation of stenotic flows. Part 2. Pulsatile flow, *J. Fluid Mech.* 582 (10 July) (2007) 281–318.
13. **Molla M. M., Paul M. C., Roditi G.**, LES of additive and non-additive pulsatile flows in a model arterial stenosis, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering.* 13 (1) (2010) 105–120.
14. **Paul M. C., Molla M. M.**, Investigation of physiological pulsatile flow in a model arterial stenosis using large-eddy and direct numerical simulations, *Appl. Math. Model.* 36 (9) (2012) 4393–4413.
15. **Gataulin Ya. A., Smirnov E. M.**, A flow in the blood vessel with a one-side stenosis: numerical study of the structure and local turbulization, *St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics.* 14 (1) (2021) 72–84.
16. **Sukhapure K., Burnsa A., Mahmuda T., Spoonerb J.**, CFD modelling and validation of head losses in pipe bifurcations, In book: 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 489–494.
17. **Mikheev N. I., Dushin N. S.**, A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos, *Instruments and Experimental Techniques.* 59 (6) (2016) 882–889.
18. **Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H.**, A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids.* 3 (7) (1991) 1760–1765.
19. **Lilly D. K.**, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Phys. Fluids.* 4 (3) (1992) 633–635.
20. **Jeong J., Hussain F.**, On the identification of a vortex, *J. Fluid Mech.* 285 (25 February) (1995) 69–94.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАТАУЛИН Яков Александрович – ассистент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 yakov_gataulin@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-0200-6508

СМИРНОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
 emsmirnov2003@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-7218-6372

МОЛОЧНИКОВ Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
 vmolochnikov@mail.ru
 ORCID: 0000-0001-8182-6856

МИХЕЕВ Андрей Николаевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Республика Татарстан, Россия.

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского 2/31
 AndreiRonnieMiheev@yandex.ru
 ORCID: 0000-0002-8687-8994

THE AUTHORS

GATAULIN Yakov A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
yakov_gataulin@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0200-6508

SMIRNOV Evgueni M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
emsmirnov2003@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7218-6372

MOLOCHNIKOV Valery M.

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
10, K. Marx St., Kazan, Tatarstan, 420111, Russia
vmolochnikov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8182-6856

MIKHEEV Andrei N.

Federal Research Center ‘Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences’
2/31, Lobachevsky St., Kazan, Tatarstan, 420111, Russia
AndreiRonnieMiheev@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-8687-8994

*Статья поступила в редакцию 01.10.2022. Одобрена после рецензирования 17.10.2022.
Принята 17.10.2022.*

Received 01.10.2022. Approved after reviewing 17.10.2022. Accepted 17.10.2022.