

УДК 532.517.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ

© Пашкова Н.Д.^{1,2}, Чуприн Г.Е.²

¹Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр
Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

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

Научный руководитель: Молочников В.М.^{1,2}, д-р техн. наук, с.н.с.

¹Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр
Российской академии наук, г. Казань, Российская Федерация

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

e-mail: pashkova-2000@mail.ru

Ключевые слова: закрученное течение, ламинарно-турбулентный переход, перемежаемость, вихрь.

Закрученные течения встречаются в различных технических приложениях (форсунки, центрифуги, диспергаторы и т. д.). Такие течения имеют сложный трехмерный и нестационарный характер, что усложняет их изучение. Наибольшее число исследований подобных течений проводилось для турбулентного потока, а ламинарные и переходные режимы практически не изучены [1], хотя закрутка при определенных условиях может приводить к затягиванию ламинарно-турбулентного перехода или, напротив, к более ранней турбулизации потока по сравнению с течением без закрутки. Закрутка может интенсифицировать теплоотдачу за элементами дискретной шероховатости поверхности теплообменников и систем охлаждения при их работе в области низких и умеренных чисел Рейнольдса, а также в микро- и миниканалах смесительных устройствах. Важнейшей областью применения результатов исследования процессов ламинарно-турбулентного перехода в закрученных отрывных течениях в каналах является биомеханика кровообращения, а именно гемодинамика течения в элементах сердечно-сосудистой системы человека. В 30-х годах XX столетия был зарегистрирован факт закрутки крови в крупных сосудах. Однако влияние данного фактора на гемодинамику элементов сердечно-сосудистой системы (в частности, в области соединения шунта с артерией) практически не изучено. Целью настоящего исследования является изучение структуры течения в трубе после локальной закрутки потока для дальнейшего применения результатов при изучении его влияния на структуру отрывных зон при номинально ламинарных режимах течения.

Исследование проводилось двумя методами: эксперимент и численное моделирование. Для экспериментального исследования использовалась установка, принцип работы которой описан в [2]. Рабочий участок представлял собой гладкую прозрачную трубу с внутренним диаметром $d = 17.4$ мм с четырехлопастным лопаточным завихрителем, имеющим на выходе угол установки лопаток 23° . Измерения были выполнены с использованием планарного оптического метода Smoke Image Velocimetry (SIV). Изучалось стационарное течение с числами Рейнольдса $Re = 240, 500, 800, 1200, 1500, 1640$. Прямое численное моделирование выполнялось на основе решения нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса в расчетной среде Ansys Fluent. Использовалась неструктурированная тетраэдральная сетка с 4 641 820 ячеек. Показано удовлетворительное совпадение расчетных и

экспериментальных профилей скорости до $Re = 240$ –800, однако при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса наблюдаются некоторые расхождения в результатах, что, скорее всего, объясняется отличием геометрии реального завихрителя, от его модели, используемой при численном моделировании.

Результаты исследования показывают, что непосредственно за лопатками завихрителя формируются зоны с максимумами скорости, которые вращаются ниже по течению и далее «размываются» за счет вязких эффектов (рис. 1). При наименьшем числе Рейнольдса ($Re = 240$) это происходит на расстоянии трех калибров от завихрителя, при $Re = 500$ на $x/d \approx 9$, а при дальнейшем увеличении Re ядро вихря не имеет осесимметричную структуру и сохраняет локальные максимумы скорости в следе от лопаток (рис. 2).

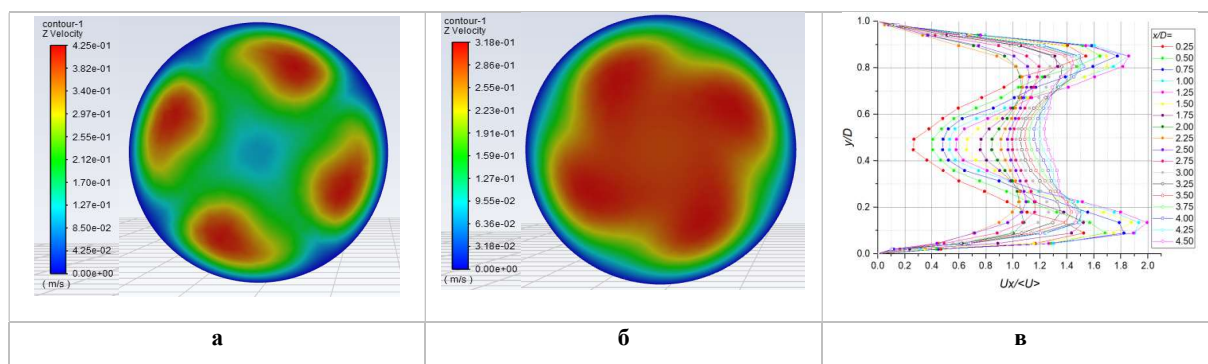


Рисунок 1 – Результаты численного моделирования распределения осевой компоненты скорости при $Re = 500$ (а – $x/d = 1$; б – $x/d = 5.17$) и эксперимента (в)

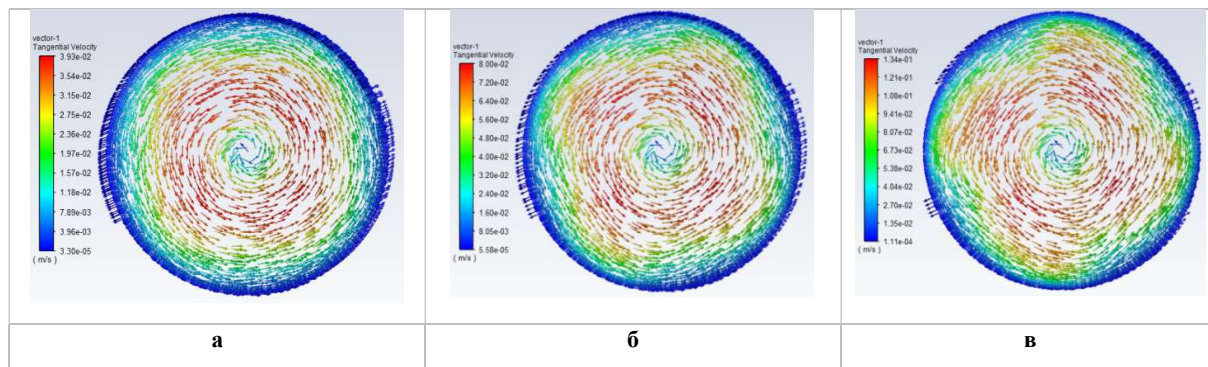


Рисунок 2 – Результаты численного моделирования распределения окружной компоненты скорости при различных числах Рейнольдса на расстоянии $x/d = 9.2$: а – $Re = 500$; б – $Re = 800$; $Re = 1200$

В распределении окружной скорости потока непосредственно за завихрителем можно выделить две зоны: область вынужденного и область свободного вихря. По результатам эксперимента эта граница четко видна на расстоянии $0.75...0.81$ радиуса (варьируется от Re). Изменение окружной компоненты скорости не имеет линейной зависимости от радиуса на участке вынужденного вихря, на основе чего можно сделать вывод, что жидкость движется не по закону твердого тела, который полностью справедлив в случае идеальной жидкости (рис. 3).

Для оценки интенсивности закрутки течения вводят интегральный параметр закрутки S , определяющий отношение момента количества движения потока к осевому количеству движения [3] (рис. 4). Из рисунка видно, что при $Re = 240$ степень закрутки в конце области измерений полностью затухает, а течение становится классически ламинарным (что подтверждается профилями скорости и низким уровнем пульсаций). При $Re = 500$ закрутка также монотонно убывает, профиль скорости имеет тенденцию к восстановлению, но на исследованной длине трубы полностью не выравнивается.

При $Re \geq 800$ степень закрутки слабо зависит от числа Рейнольдса, что в дальнейшем позволит анализировать влияние одинаковой степени закрутки на характер течения с различными скоростями (соответствующих указанному диапазону исследования по Re).

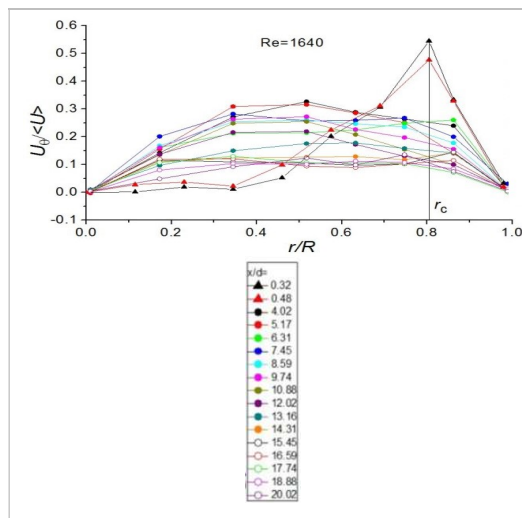


Рисунок 3 – Изменение окружной скорости на разном удалении от завихрителя при $Re = 1640$ при экспериментальном исследовании

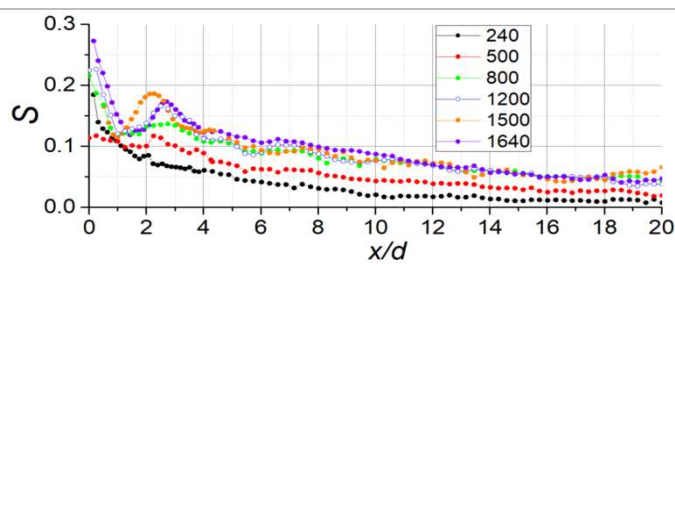


Рисунок 4 – Изменение степени закрутки на различных числах Рейнольдса по длине канала при экспериментальном исследовании

Одним из важных аспектов в исследовании закрученного течения является наличие или отсутствие прецессии ядра вихря – его периодическое отклонение от оси симметрии канала и колебания вокруг этой оси на относительно низких частотах. Данное явление было зафиксировано только при $Re = 1640$, что скорее всего, объясняется возмущениями, возникающими от области обратных течений, формируемых непосредственно за заверителем. При меньших числах Рейнольдса зоны возвратных токов вблизи завихрителя не обнаружено.

Для изучения влияния закрутки потока на процессы ламинарно-турбулентного перехода были предприняты попытки обнаружения признаков перехода к турбулентности: резкого роста пульсаций скорости и появления перемежаемости течения (чередование периодов ламинарного и турбулентного течения на осциллограммах скорости). В экспериментах при $Re \leq 800$ среднеквадратичные пульсации скорости составляли менее 2 % от среднерасходной скорости потока, что характерно для ламинарного потока. С увеличением числа до $Re = 1200$ наблюдалось трехмодовое распределение интенсивности пульсаций скорости по диаметру трубы, что характерно для перехода к турбулентности в гладкой трубе при незакрученном течении. При $Re > 1200$ обнаружен значительный рост уровня пульсаций (до 20 %), а также появление областей с перемежаемостью свидетельствует о наличии признаков ламинарно-турбулентного перехода.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (грант № 25-19-00133).

Библиографический список

1. Helgadóttir, Á. Mesh twisting technique for swirl induced laminar flow used to determine a desired blade shape / Á. Helgadóttir [et al.] // Applied Sciences. – 2018. – Т. 8, №. 10. – С. 1865.
2. Молочников, В.М. Гемодинамические аспекты проблемы увеличения срока службы сосудистых трансплантатов / В.М. Молочников // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2023. – Т. 66, № 11. – С. 94–108.
3. Щукин, В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.