

УДК 612.133/.179+532.5.031

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СХОДЯЩЕМСЯ КАНАЛЕ В КАЧЕСТВЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ КРОВИ В СЕРДЦЕ И АОРТЕ

© 2024 г. Я. Е. Жарков, Ш. Т. Жоржолиани, А. А. Сергеев, А. В. Агафонов, А. Ю. Городков*, академик РАН Л. А. Бокерия

Поступило 10.12.2023 г.

После доработки 15.01.2024 г.

Принято к публикации 17.01.2024 г.

Проведено исследование закрученных потоков в каналах, соответствующих статической аппроксимации проточных каналов сердца и магистральных сосудов, имеющих продольно-радиальный профиль $zR^2 = \text{const}$ и вогнутую обтекаемую поверхность в начале продольной координаты. Проведен сравнительный анализ структуры течения в конфигурациях каналов $zRN = \text{const}$, где $N = -1, 1, 2, 3$ в отсутствии и при наличии вогнутой поверхности. Численное моделирование сопоставляли с результатами гидродинамических экспериментов по расходным характеристикам и форме линий тока. Численную модель использовали для определения структуры скоростей, потерь на вязкое трение и сдвиговых напряжений. Численное моделирование течений в стационарном режиме для каналов без вогнутой поверхности показало, что в канале $zR^2 = \text{const}$ возникает устойчивая вихревая структура течения при наименьших потерях на вязкое трение. Наличие вогнутой поверхности достаточного размера существенно уменьшает потери на вязкое трение и сдвиговые напряжения в стационарном и пульсирующем режимах.

Ключевые слова: вихревые потоки, форма проточного канала, аппроксимация формы сердца и сосудов, закрученное течение крови, потери на вязкое трение, сдвиговые напряжения.

DOI: 10.31857/S2686738924020191, EDN: WEAKAL

ВВЕДЕНИЕ

Многими экспериментальными и клиническими наблюдениями доказано, что в норме поток крови в сердечно-сосудистой системе является закрученным в центральных отделах системы кровообращения – сердце и магистральных сосудах. Это обусловлено особенностями динамической геометрической конфигурации проточного канала сердца, динамикой сердечного сокращения и особыми упруго-деформационными свойствами сосудов, принимающих сердечный выброс [1, 2]. В ранее опубликованных работах [3–7] также было отмечено, что в левых отделах закрученная структура потока крови поддерживается в течение всего сердечного цикла в каждом сегменте от левого предсердия до конца аорты.

Тем не менее физиологическая роль закрученного течения в настоящее время остается не-

выясненной. Помимо этого, интерес также представляет влияние характера течения на состояние и функции клеточных и белковых компонентов крови и стенок проточных каналов, включая роль закрутки потока в регуляторных и компенсаторных процессах.

Определение физиологической роли закрученных течений в отделах сердца посредством прямых клинических исследований является сложной задачей в связи с ограниченной доступностью и недостаточной точностью методов измерений. Целесообразным является изучение потоков посредством использования физических и численных моделей, при которых возможно проведение анализа внутренней структуры формируемых течений. Тем не менее моделирование в условиях динамически изменяемой геометрии сопряжено с трудностями при физическом моделировании, так как неясны критерии подобия физической модели и реальной системы кровообращения. Принимая во внимание вышесказанное, моделирование требует наличия достоверной статической аппроксимации мгновенной динамической конфигурации проточного канала сердца и сосудов.

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева» МЗ РФ

*E-mail: agorodkov@bk.ru

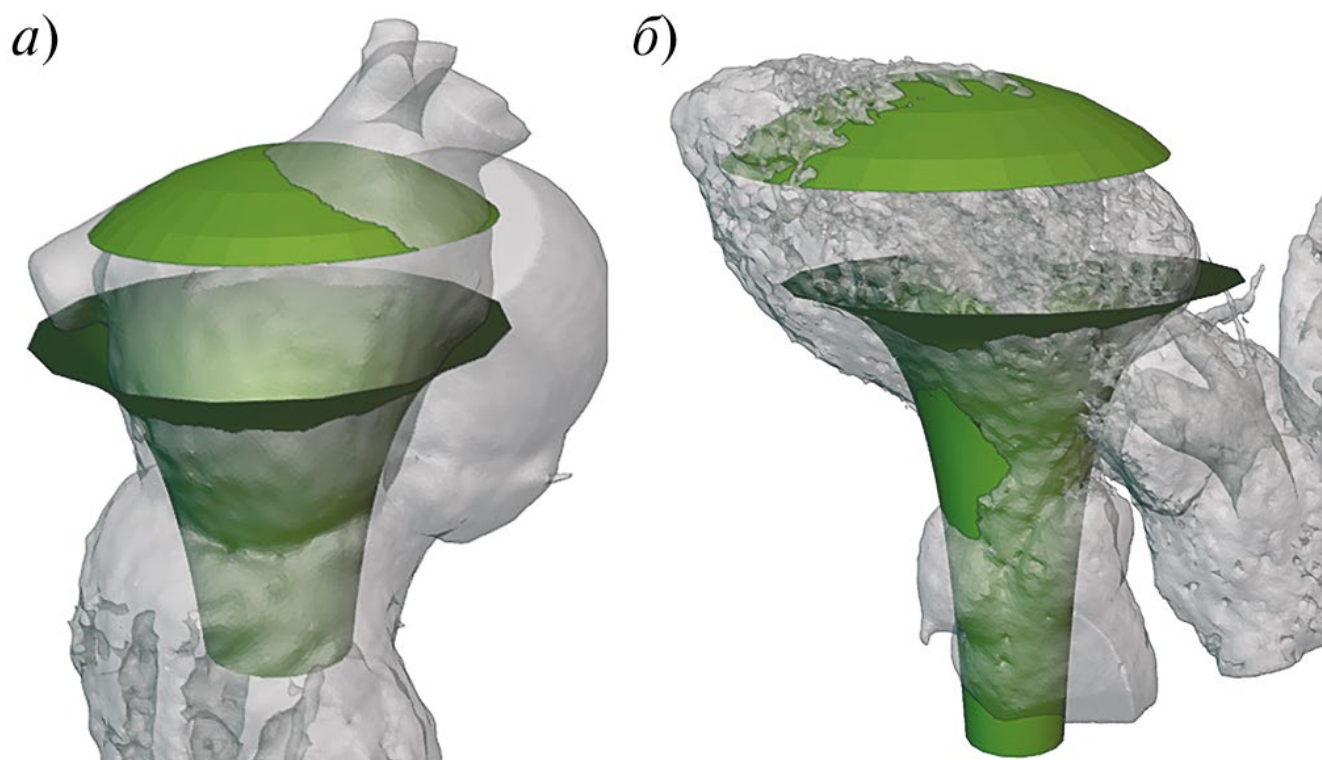


Рис. 1. Геометрическая аппроксимация формы левого предсердия (а) и левого желудочка (б) посредством канала статической формы с продольно-радиальным профилем $zR^2 = \text{const}$ с вогнутой поверхностью.

Существование закрученного характера течения экспериментально было доказано на основании анализа геометрической конфигурации полостей левого предсердия, левого желудочка и аорты по данным компьютерной томографии. По результатам экспериментальных исследований показано, что каждая из этих полостей в момент перемещения струи с достаточной точностью может быть аппроксимирована посредством двух поверхностей, соответствующих каналу сердечного отдела и вогнутой поверхности, вдоль которой кровь поступает в соответствующую полость.

На основании ранее опубликованных решений уравнений Навье – Стокса и неразрывности [8] для аппроксимации канала использована поверхность, продольно-радиальный профиль которой соответствует выражению

$$zr^2 = \text{const},$$

где z и r — продольная и радиальная координаты.

Помимо этого известно, что при обтекании поверхности с нанесенным рельефом в виде углублений — лунок в них формируются встроенные закрученные струи, по структуре соответствующие вихрям Бюргерса [9]. По аналогии с этим явлением можно предположить, что в основании закрученной струи, формируемой в камерах сердца, присутствует вогнутая поверхность, подобная

лунке. Так, для левого предсердия эта поверхность соответствует куполу левого предсердия, а для левого желудочка эта поверхность соответствует свободной стенке. Форма этой вогнутой поверхности была определена аналитически [10], однако она может быть с определенными допущениями аппроксимирована половиной двуполостного гиперболоида.

Целью настоящей работы является анализ структуры течений, формируемых в статической геометрии, с применением рассмотренных аппроксимаций для выявления положительных эффектов, сопутствующих наличию закрученного течения и оказывающих влияние на состояние потока в центральных отделах системы кровообращения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как было ранее сказано, прямые исследования потока крови в сердечно-сосудистой системе представляют значительные трудности из-за сложности системы, множества взаимосвязанных параметров и механизмов их регуляции. Поэтому выбранным подходом к исследованию явилось изучение закрученных течений в конфузорных каналах различной геометрической конфигурации с помощью физического и численного моделирования.

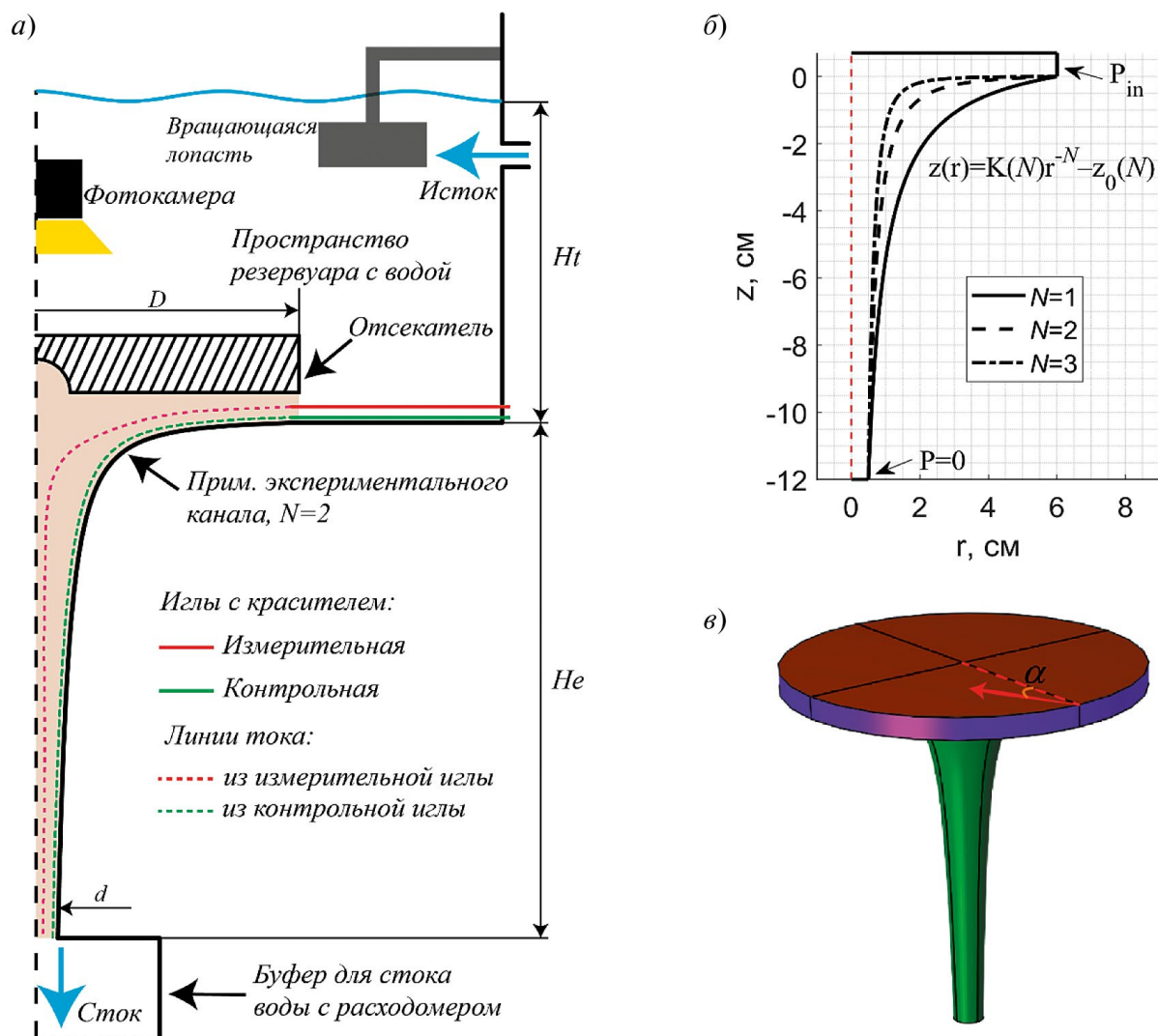


Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и геометрическая конфигурация численной модели (б, в): а) H_t – высота столба воды в резервуаре с водой, H_e – высота канала, D – диаметр отсекающего отверстия канала, d – диаметр выходного отверстия канала; б) P_{in} – задаваемое статическое давление на входе в канал; в) α – угол скорости жидкости по отношению к нормали поверхности истока. Физическое моделирование для различных геометрических конфигураций канала проводили в воде, перепад давления в канале создавали с помощью столба воды в резервуаре, закрутку жидкости организовывали посредством вращающейся лопасти. Регистрацию расхода проводили на выходе экспериментального канала, линии тока визуализировали посредством введения красителя в канал с применением двух игл: измерительной и контрольной. На рис. 2 б, в показано, что численное моделирование проводили в условиях, идентичных экспериментальным. Граничное условие статического давления на входе в канал изменяли в зависимости от требований моделирования. Создание азимутальной составляющей скорости жидкости осуществляли посредством параметризации угла α между вектором скорости на входе канала к нормали входной поверхности.

Несмотря на то что исследование закрученных течений с применением численного моделирования является достаточно распространенным [11–15], его использование требует корректного выбора типа численной модели, который, в свою очередь, зависит от нюансов геометрии, свойств среды и характерных скоростей течения. Помимо этого, корректность выбора типа модели требует обязательной валидации результатов численного моделирования с результатами физического эксперимента.

На основании экспериментальных исследований проточных каналов сердца и исследований динамических объемных изображений, полученных с помощью томографии, аппроксимация формы канала поверхностью с профилем $zR^2 = \text{const}$ оказалась наиболее близкой к действительной. Поэтому при физическом моделировании закрученного потока жидкости было проведено сравнение данной формы канала с каналами, соответствующими профилям $zR^N = \text{const}$, где $N = -1; 1$ и 3 . Помимо исследования формы профиля канала также про-

водилось исследование влияния формы и размеров обтекаемой вогнутой поверхности в начале закрученной струи на характер течения при физическом и численном моделировании (рис. 1)

1. *Экспериментальная установка.* Схематическое изображение установки для физического моделирования течения приведено на рис. 2а. Она состоит из подающего и принимающего резервуаров, между которыми установлен экспериментальный канал высотой 120 мм, ограниченный от основного объема жидкости в подающем резервуаре отсекателем, имеющим плоскую или вогнутую поверхность. Зазор между устьем канала и отсекателем составлял 8 мм (рис. 2в).

В качестве рабочей среды системы использовали воду. Голубыми стрелками отражены направления потока жидкости. Модели каналов были изготовлены из акрилового стекла, позволяющего производить видеорегистрацию формы линий тока внутри канала.

Для этого в область щели между краем отсекателя и началом канала на заданной высоте (от 1 до 7 мм) устанавливали 2 иглы с малым диаметром выходного отверстия (~1 мм), через которые подавали краситель с плотностью, равной плотности воды. Одну иглу (контрольная) устанавливали на одной и той же высоте (4 мм), положение второй иглы (измерительной) изменяли от 1 до 7 мм. Скорость истечения красителя подбирали так, чтобы избежать размывания. Регистрацию линий тока производили посредством камеры, расположенной над отсекателем.

Закрученное течение в пространстве исследуемой системы создавали посредством вращения лопасти большой площади в пространстве резервуара. Скорость вращения лопасти выбирали таким образом, чтобы угол суммарного вектора скорости по отношению к поверхности щели составлял ~30° (по данным визуализации).

В эксперименте исследовали следующие варианты каналов:

1) конический канал с острой кромкой и углом конуса 30°;

Таблица 1. Значения чисел Рейнольдса для различных геометрий экспериментальных систем

Форма экспериментальной системы	Значение в зоне края отсекателя (щели)	Значение на выходе
Конус	1226	$24.8 \cdot 10^3$
$zR^N = \text{const}$	1327 ± 36	$(26.5 \pm 0.2) \cdot 10^3$
$zR^2 = \text{const}$		
$zR^3 = \text{const}$		

2) три конфузорных канала, соответствующих условиям $zR^N = \text{const}$, где показатель степени N был равен 1; 2 и 3 соответственно;

3) два варианта обтекаемой поверхности отсекателя: плоская и вогнутая.

Используемые методы регистрации (видеорегистрация линий тока, регистрация расхода) не позволяют оценить пространственные распределения большого количества интересующих параметров, таких как сдвиговые напряжения, поле скоростей и давлений, потери на вязкое трение. Для определения данных параметров была использована численная модель.

2. *Численная модель.* Для моделирования статических и динамических течений в программе Comsol Multiphysics была разработана численная модель, схематическое изображение которой приведено на рис. 2б, в.

Согласно приведенному изображению, геометрия канала в аксиально-симметричной системе координат состояла из боковой криволинейной поверхности с высотой, равной 12 см, и описываемой выражением

$$Z(R) = \frac{K(N)}{R^N} - z_0(N)$$

где N – показатель степени; $K(N)$ и $Z_0(N)$ – константы системы, зависящие от показателя степени, нижней и верхней частей системы с диаметрами

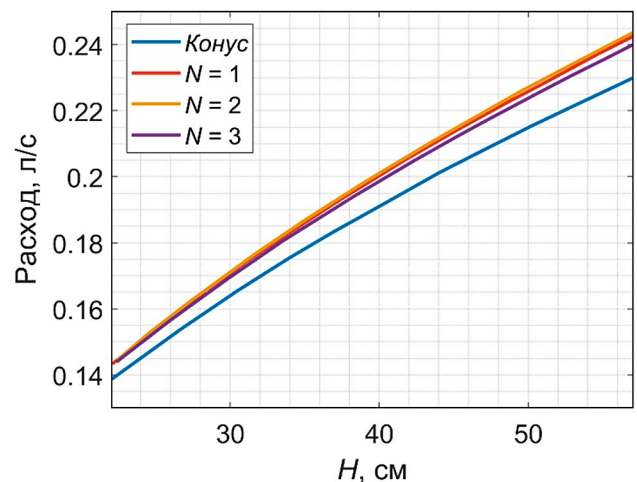


Рис. 3. Зависимость расходных характеристик от высоты столба жидкости в резервуаре для каналов различной формы: Конус – зависимость расхода для канала конической формы. $N = 1, 2, 3$ – зависимость расхода для каналов $zR^N = \text{const}$ с указанным показателем степени. Видно, что расходные характеристики для каналов $zR^N = \text{const}$ имеют малое отличие. Расходные характеристики канала конической формы ниже на 4%.

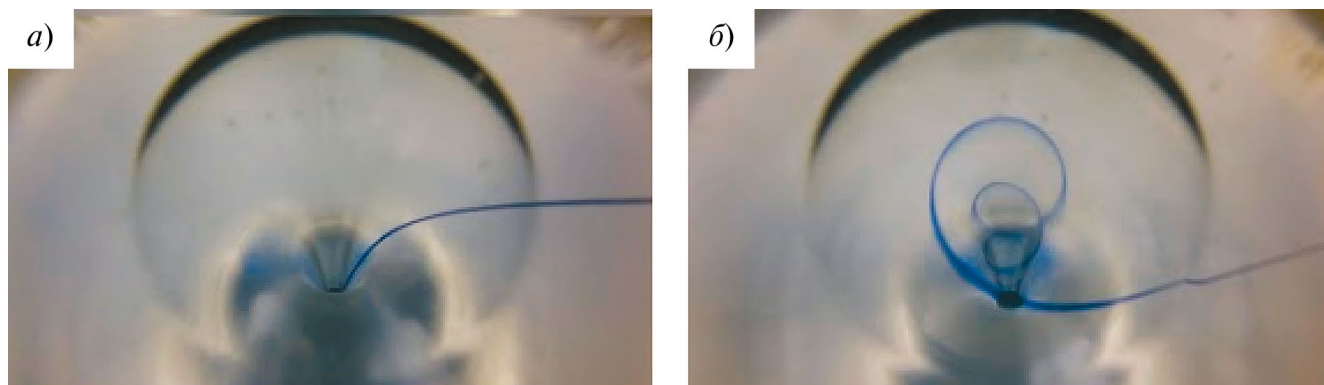


Рис. 4. Фотографии линий тока в отсутствие (а) и при наличии (б) закрутки для канала $zR^2 = \text{const}$. Видно, что в отсутствии азимутальной составляющей скорости течения форма линии тока жидкости повторяет форму канала, в то время как при ее наличии форма имеет вид сходящейся спирали.

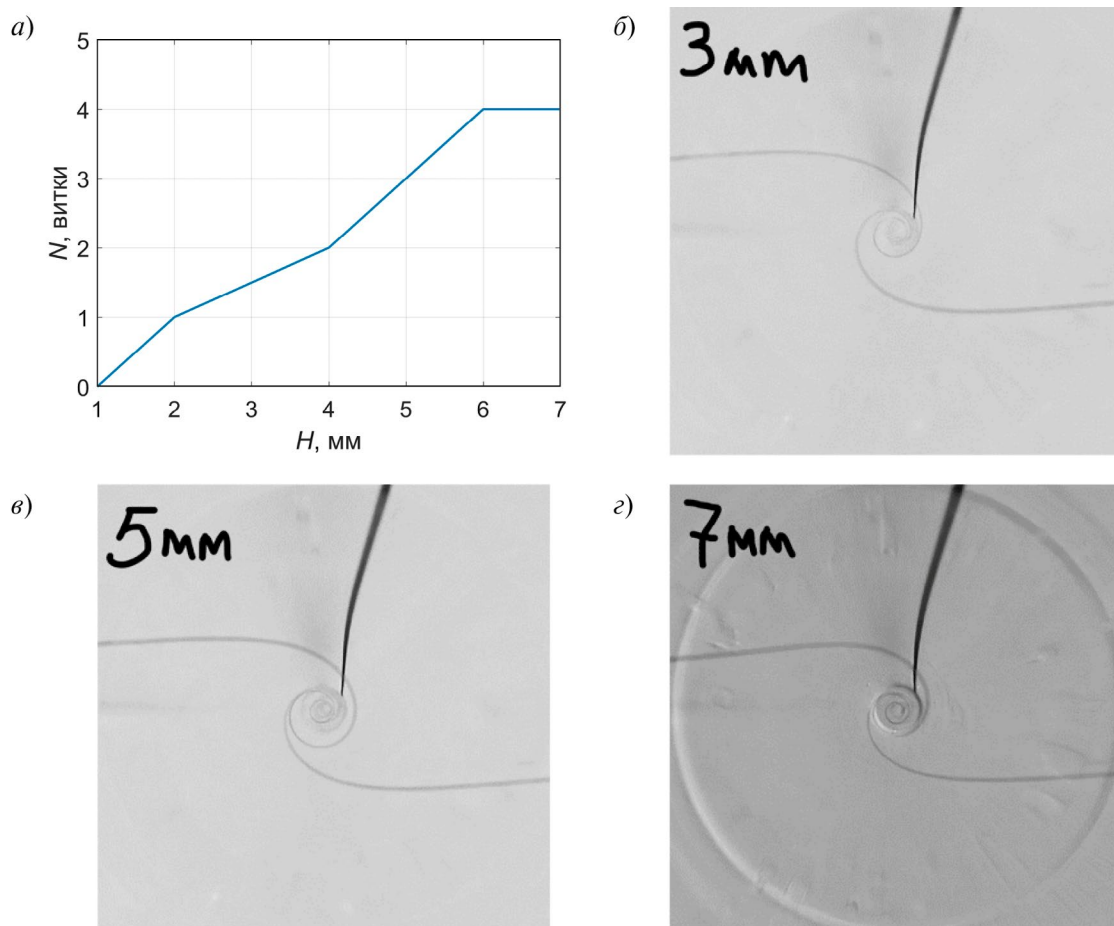


Рис. 5. Экспериментальная зависимость количества витков линии от высоты подъема измерительной иглы в щели канала (а) и фотографии линий тока при положении камеры над каналом (б-г): Контрольная игла расположена справа, измерительная игла — слева; струя красителя сверху визуализирует границу канала. Из рис. 5 видно, что количество витков спиральной линии тока нарастает при увеличении высоты подъема измерительной иглы. По рис. 5г видно, что визуальное отслеживание количества витков в крайнем положении измерительной иглы затруднено.

1 и 12 см соответственно, входной щели, высота которой составляет 8 мм.

Для проведения численного моделирования в программе Comsol Multiphysics с целью определения пространственного распределения параметров (давлений, скоростей, завихренностей, сдвиговых напряжений) использовали модуль “Вычислительная гидродинамика” (CFD: SPF) с использованием модели турбулентности $k-\omega$ [16–17].

Граничные условия включали стационарные давления на входе и выходе в канал (рис. 2, б), а также условие проскальзывания жидкости вблизи поверхности стенок. Для задания граничных условий использовали стандартные средства программы Comsol Multiphysics для случая модели $k-\omega$.

В качестве граничного условия течения жидкости вблизи поверхности стенок канала использовалось граничное условие Automatic Wall Treatment, являющегося выбором по умолчанию при использовании модели $k-\omega$ в программе Comsol Multiphysics. Данное граничное условие является гибким способом описания течения вблизи поверхности стенок при различном качестве детализации конечно-элементной сетки. В случае наличия детальной сетки граничное условие Automatic Wall Treatment позволяет получить точное описание течения с малым числом Рейнольдса вблизи поверхности, в то время как при более грубых дискретизациях для численного решения используется комбинация линейного и логарифмического подслоев.

Для визуализации линий тока в программе Comsol Multiphysics для рассматриваемой геометрии применяли модуль “Particle Tracing For Fluid Flow” (FTR). Расчет линий тока проводили в два этапа:

- 1) на первом этапе производили расчет полей давления и скоростей в стационарном режиме;
- 2) на втором этапе расчета, используя данные стационарного распределения параметров, производили динамический расчет траекторий движения

частиц с применением FTR. Линии тока течения определяли как совокупность точек траекторий движения частиц, от щели вдоль канала (рис. 2в). Учет вязких взаимодействий в потоке производили в соответствии с законом Стокса.

Для валидации численной модели использовали форму и длину линии тока в физическом и численном экспериментах совместно с расходными характеристиками потока через исследованные каналы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения преимуществ закрученных течений физическое моделирование проводили для всех комбинаций перечисленных параметров:

- отсутствие/наличие закрутки в накопительном резервуаре;
- высота жидкости в резервуаре;
- геометрия экспериментального конфузора.

Несмотря на различия в геометрии каналов, экспериментальные условия на входе и выходе были одинаковы (табл. 1).

Расходные характеристики потока определяли по времени истечения равного объема жидкости под действие силы тяжести в режиме свободной струи, т.е. сток воды происходил в воздушную среду. Для регистрации формы линий тока к выходной части канала подсоединяли резервуар, заполненный водой, меняя режим истечения со свободной струи на затопленную струю.

По результатам регистрации расходных характеристик было получено, что факт наличия азимутальной составляющей скорости жидкости не влияет на время истечения равного объема жидкости для всех исследованных каналов. Скорость истечения равного объема жидкости через каналы формы $zR^N = \text{const}$ достоверно выше на 4%, чем аналогичная скорость в канале с формой конуса на всем диапазоне давлений (рис. 3).

Для каждого из экспериментов регистрировали форму линий тока при различных высотах расположения игл с контрастом.

Визуализация линий тока течения жидкости в отсутствие закрутки показала, что жидкость движется по кратчайшему пути в сторону выходного отверстия канала (рис. 4а), а при наличии закрутки линии тока во всех каналах (включая конический) представляют собой осесимметричную сходящуюся спираль (см. рис. 4б), т.е. траектория движения каждого элемента жидкости существенно удлиняется.

По результатам экспериментальных исследований получено, что количество витков спиральной

Таблица 2. Расходные характеристики при физическом и численном моделировании

Форма экспериментальной системы	Расход, л/с	
	Численная модель	Физическая модель
Конус	0.207	0.204
$zR = \text{const}$	0.215	0.214
$zR^2 = \text{const}$	0.215	0.214
$zR^3 = \text{const}$	0.212	0.212

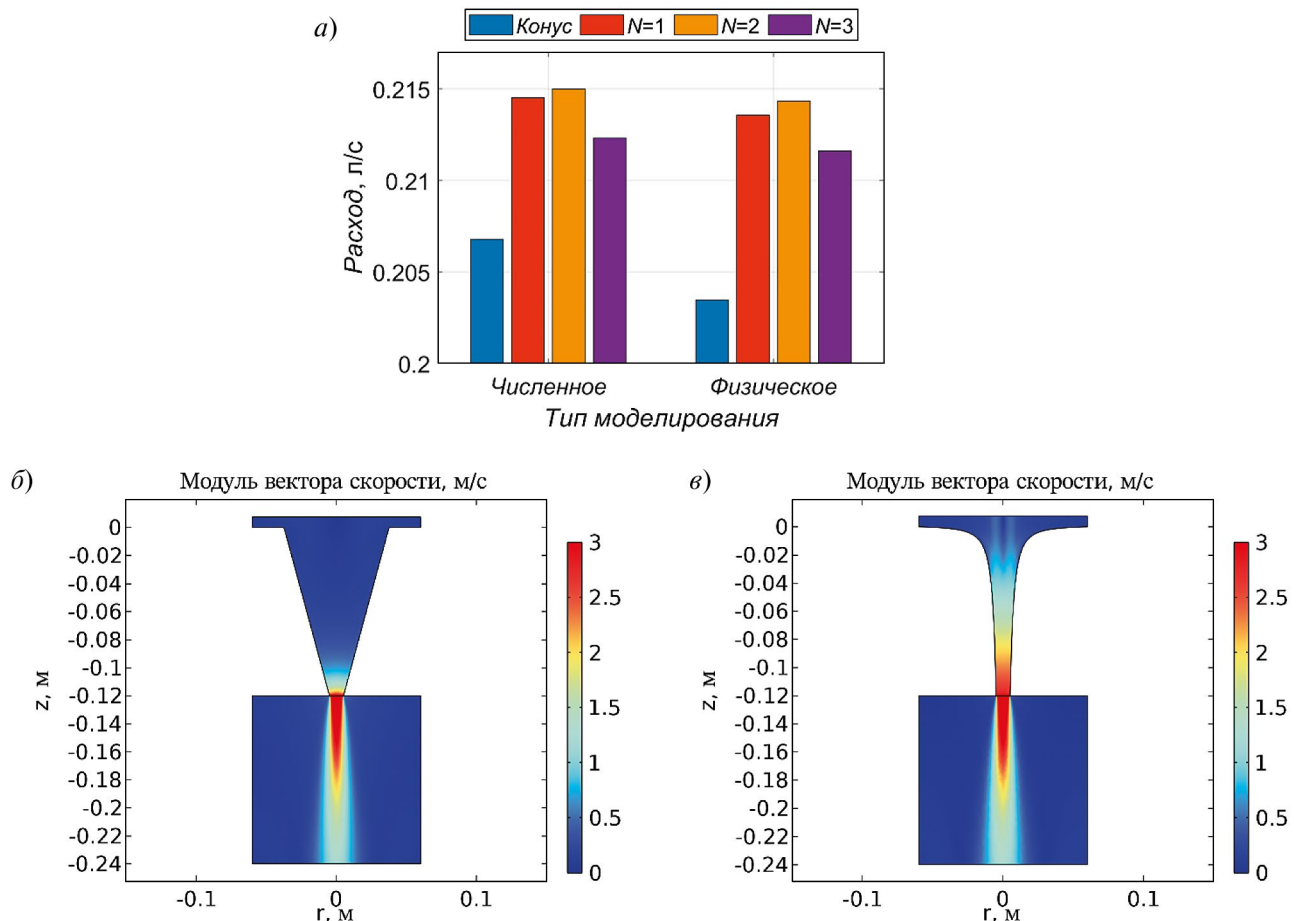


Рис. 6. Расходные характеристики при численном и физическом моделировании для разных форм канала (а), структура скоростей течения для каналов конической формы (б) и формы $zR^N = \text{const}$ (е): Cone — зависимость расхода для канала конической формы. $N = 1, 2, 3$ — зависимость расхода для каналов $zR^N = \text{const}$ с указанным показателем степени. Видно, что расходные характеристики имеют хорошее совпадение. По рис. 6б, е видно, что уменьшение расхода для каналов $zR^N = \text{const}$ связано с высоким гидродинамическим сопротивлением в зоне максимального сужения канала.

линии тока зависит от высоты подъема измерительной иглы (рис. 5), но не зависит ни от показателя степени функции $zR^N = \text{const}$, ни от наличия вогнутой поверхности.

Из представленных результатов физического моделирования не представляется возможным определить положительные эффекты, возникающих вследствие наличия закрученного течения, как и проведение детального анализа структуры течения. Для более детального анализа особенностей течения жидкости в рассматриваемых каналах были использованы методы численного моделирования.

Как ранее было указано, моделирование закрученных потоков требует обязательной валидации с результатами физического эксперимента, поэтому важно сформулировать однозначные признаки подобия модельного течения и реального потока. В качестве таких признаков в нашем исследовании

были выбраны длина и количество витков спиральной линии тока закрученного течения, а также расходные характеристики для каналов различной геометрической конфигурации.

В результате численного моделирования предполагалось выявить характерные отличия течений в каналах формы $zR^N = \text{const}$ с разным показателем степени ($N = 1; 2; 3$), а также выявить влияния вогнутой поверхности на характер течения и его характеристики.

ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Для валидации численной модели было произведено сравнение расходных характеристик, полученных в ходе численного и физического экспериментов, и определены формы линий токов.

Для валидации численной модели по параметру расходных характеристик численная модель

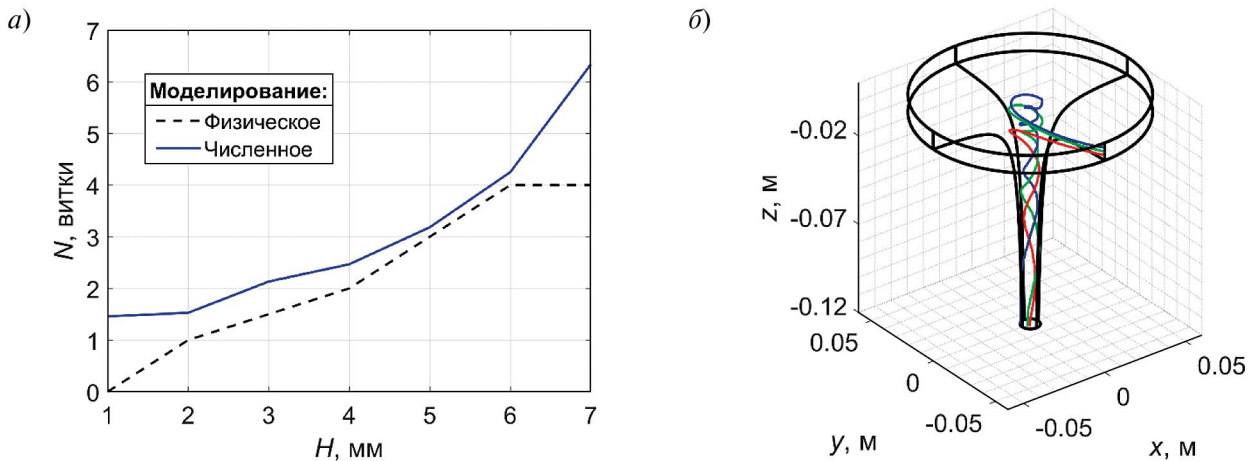


Рис. 7. Зависимости числа витков линии тока от высоты подъема иглы при физическом и численном экспериментах (а), трехмерная визуализация численно определенных линий тока для высот 3, 5 и 7 мм (б). Видно, что количество витков спиральных линий тока при численном и физическом моделировании имеют удовлетворительное совпадение.

должна быть эквивалентна физической. Так как в физическом эксперименте регистрацию расхода производили в режиме свободной струи, то численное моделирование необходимо проводить с учетом ее наличия, что, в свою очередь, ставит задачу моделирования течения двух типов сред. Тем не менее моделирование такого рода течений является избыточно ресурсоемким для целей определения расходных характеристик в настоящей задаче. В связи с этим численное моделирование проводилось для режима затопленной струи (рис. 5б, в), так как наличие воздуха в исследуемой геометрической конфигурации каналов не должно влиять на расходные характеристики при наличии вращающегося потока. Моделирование проводили при статическом давлении на входе в систему, равном 4.4 кПа (45 см водного столба), при угле $\alpha = 30^\circ$ для всех геометрических конфигураций каналов.

Расчетные результаты и результаты, зарегистрированные в физическом эксперименте, приведены в табл. 2. Согласно представленным результатам численное моделирование при описанных допущениях с достаточной точностью воспроизводит зарегистрированное различие между коническим каналом и каналами $zR^N = \text{const}$, составляющее в среднем 4.5%. Отличие между каналами $zR^N = \text{const}$ составляет менее 1.3%, что входит в диапазон погрешностей измерений физического эксперимента, хотя качественно это различие видно из графика на рис. 3.

Полученное совпадение расходных характеристик в численном и физическом моделировании свидетельствует о корректном воспроизведении в модели характера течения в рассматриваемых геометрических конфигурациях каналов.

Результаты также показывают разницу в форме структуры течения в каналах различной формы (рис. 6б, в). Во всех каналах скорость увеличивается с уменьшением радиуса. В случае конуса изменение площади сечения канала с убыванием высоты пропорционально квадрату продольной координаты z , а в случаях каналов с формой $zR^N = \text{const}$, уменьшение сечения происходит в соответствии с показателями степени N от -2 до $-2/3$. Это приводит к более быстрому возрастанию скорости вдоль каналов данной формы по сравнению с коническим каналом даже без учета закрученного характера потока.

Расходные характеристики являются интегральным параметром оценки течения, не отражающим его внутреннюю структуру. Поэтому вторым критерием для валидации численной модели являлось совпадение количества витков спирали линий тока, полученных в физическом эксперименте и при численном моделировании при равенстве давлений.

Результаты, полученные посредством расчета и зарегистрированные в ходе эксперимента, имеют удовлетворительное совпадение (рис. 7). Количество витков спиральной линии тока совпадает при положении измерительной иглы щели на высоте от 2 до 6 мм, что соответствует различному положению линии тока по радиусу струи. В крайних положениях (1 и 7 мм) отличие расчетных и экспериментальных результатов объясняется близостью стенок канала и сложностью визуальной интерпретации экспериментальных данных.

Таким образом, качественное совпадение формы линий тока и расходных характеристик в результате физического и численного моделирования

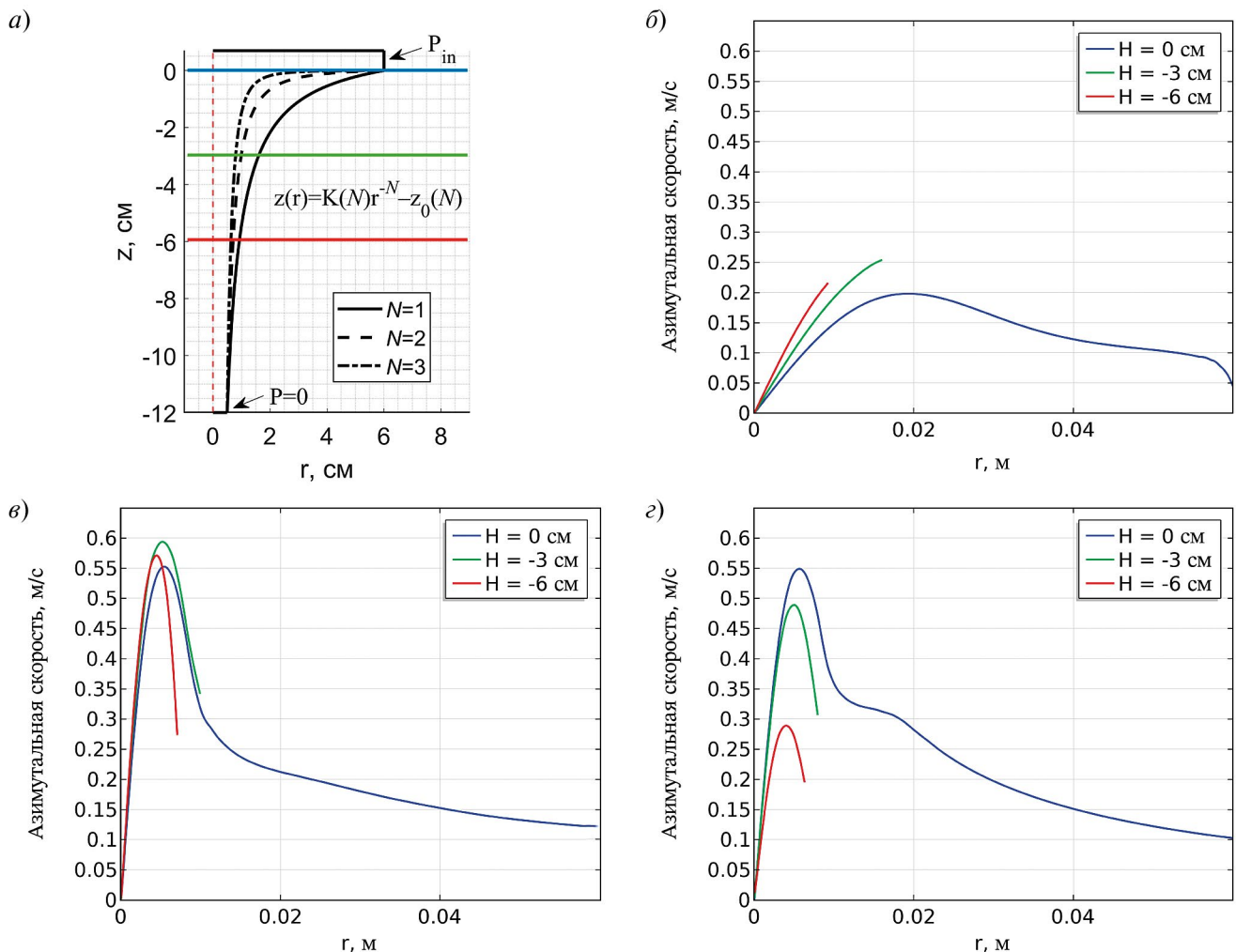


Рис. 8. Линии среза в аксиальной проекции численной модели (а), распределение азимутальной скорости в радиальной проекции для каналов $zR^N = \text{const}$ при $N = 1; 2$ и 3 (б, в, г): Синяя линия – срез на нулевой высоте канала, зеленая кривая – срез на высоте -3 см, зеленая кривая – срез на высоте -6 см. Видно, что устойчивая вихревая структура формируется только в $zR^2 = \text{const}$.

позволяет использовать модель для анализа структурных параметров течения, которые сложно измерить в эксперименте.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1. Влияние геометрической формы канала на структуру азимутальной составляющей скорости и интегральные потери на вязкое трение. Для определения различий структуры течений для каналов $zR^N = \text{const}$ с разным показателем степени N , моделирование проводили в стационарном режиме при статическом давлении на входе 5.8 кПа (60 см водяного столба).

Известно, что структура закрученного течения наиболее полно характеризуется распределением азимутальной составляющей скорости $u_\phi(r, z)$. В развитом вихревом потоке эта составляющая на

всей длине струи имеет локальный максимум при определенном значении радиуса [18].

Распределение данной составляющей для разных геометрических конфигураций каналов определяли при трех значениях продольной координаты ($0, -3$ и -6 см).

Численные определения структуры $u_\phi(r)$ при $N = 1$ показало, что вихревая структура течения формируется только в начале струи, так как форма канала позволяет течению развиваться в аксиальном направлении. Это выражается в отсутствии локальных максимумов $u_\phi(r)$ при высотах -3 и -6 см и в преобладании аксиальной составляющей скорости, что качественно уравнивает закрученное и незакрученное течения в этом канале

В каналах $N = 2; 3$ структура $u_\phi(r)$ обладает выраженным локальным максимумом на всем про-

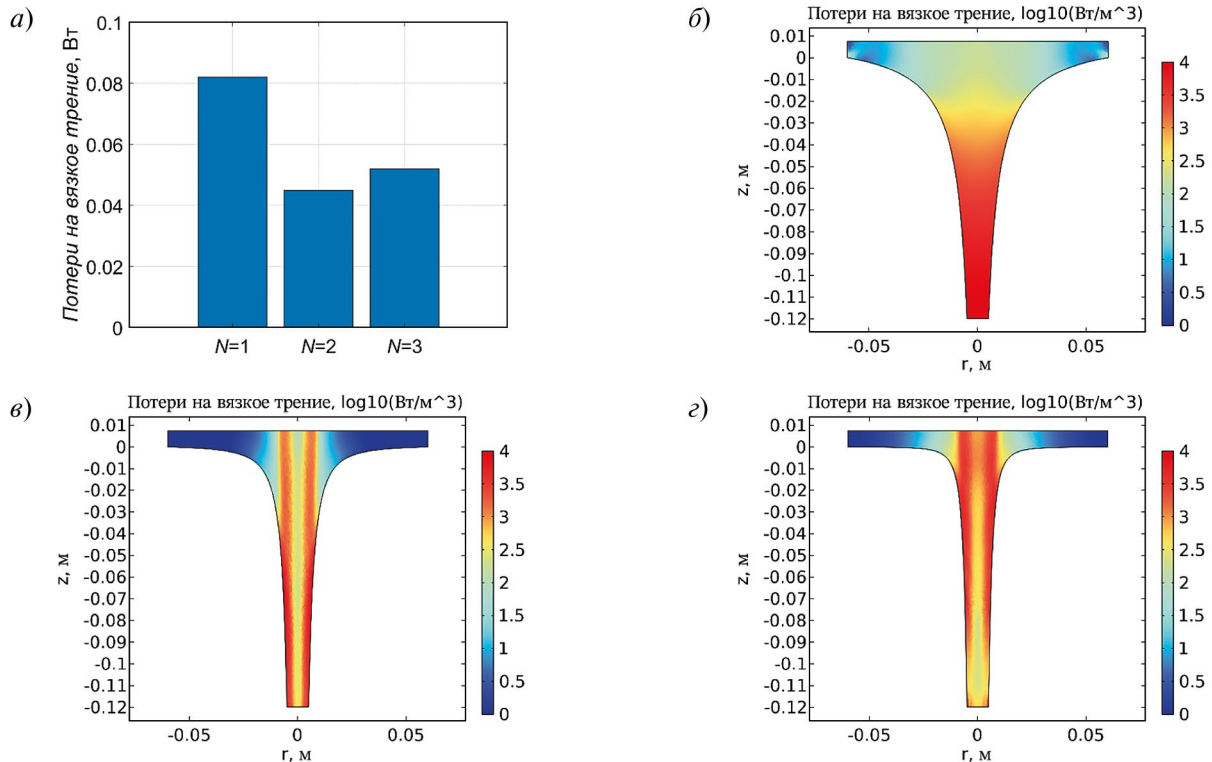


Рис. 9. Интегральные потери на вязкое трение для каналов $zR^N = \text{const}$ разного порядка степени (а), распределение потерь на вязкое трение в каналах при $N = 1$; 2 и 3 (б, в, г). Видно, что в канале с показателем степени $N = 1$ вихревая структура не формируется. В каналах с показателем степени $N = 2, 3$ течение носит вихревой характер, при этом в канале $N = 2$ значения потерь в области формирования вихря ниже, чем в случае $N = 3$.

тяжении струи. Для канала $N = 3$ максимум $u_\varphi(r)$ уменьшается вдоль струи, что говорит о диссипации азимутальной составляющей скорости. Только при $N = 2$ вихревая структура струи поддерживается без изменений на всем протяжении канала (рис. 8).

Для всех трех каналов были вычислены значения объемного интеграла потерь на вязкое трение, определяемого как

$$Q = \int \sum_w \tau_{T,j,k} \cdot Jv_{T,j,k} d\omega,$$

где τ — тензор вязких напряжений, Jv — матрица Якоби вектора скорости течения жидкости.

Показано, что наименьшие потери возникают в канале $N = 2$. Значение потерь в канале данной формы на 82% ниже, чем в канале $N = 1$, а также и на 15% ниже, чем в канале $N = 3$ (рис. 9).

Полученная разница может быть объяснена тем, что в канале $N = 1$ потери на вязкое трение увеличиваются из-за большего объема и большей площади обтекания жидкостью стенок при отсутствии развитой вихревой структуры.

В канале $N = 3$ вихревое течение в большей степени контактирует с стенками канала, что приводит к торможению азимутальной составля-

ющей скорости и вырождению вихревой структуры.

Принимая во внимание распределение азимутальных скоростей и потерь на вязкое трение, можно сделать вывод о том, что только в канале с $N = 2$ возникает и поддерживается развитое вихревое течение. Формируемый в данной геометрической конфигурации вихрь позволяет струе распространяться по всей длине канала, испытывая при этом минимальный контакт с его стенками.

Распределение вязкостных сил вдоль обтекаемой поверхности каналов и интеграл вязкостных сил вдоль поверхности каналов приведены на рис. 10. Из представленных изображений видно, что канал, соответствующий $N = 2$, обеспечивает минимум значений потерь на вязкое трение вдоль границ канала, что совпадает с данными распределения потерь на вязкое трение в объеме канала.

Из распределения вязкостных сил вдоль поверхности каналов следует, что в случае показателя степени $N = 1$ жидкость испытывает максимальное взаимодействие со стенками в области суждения около выходного отверстия. Схожие результаты были получены в работе для случая конического канала при моделировании зато-

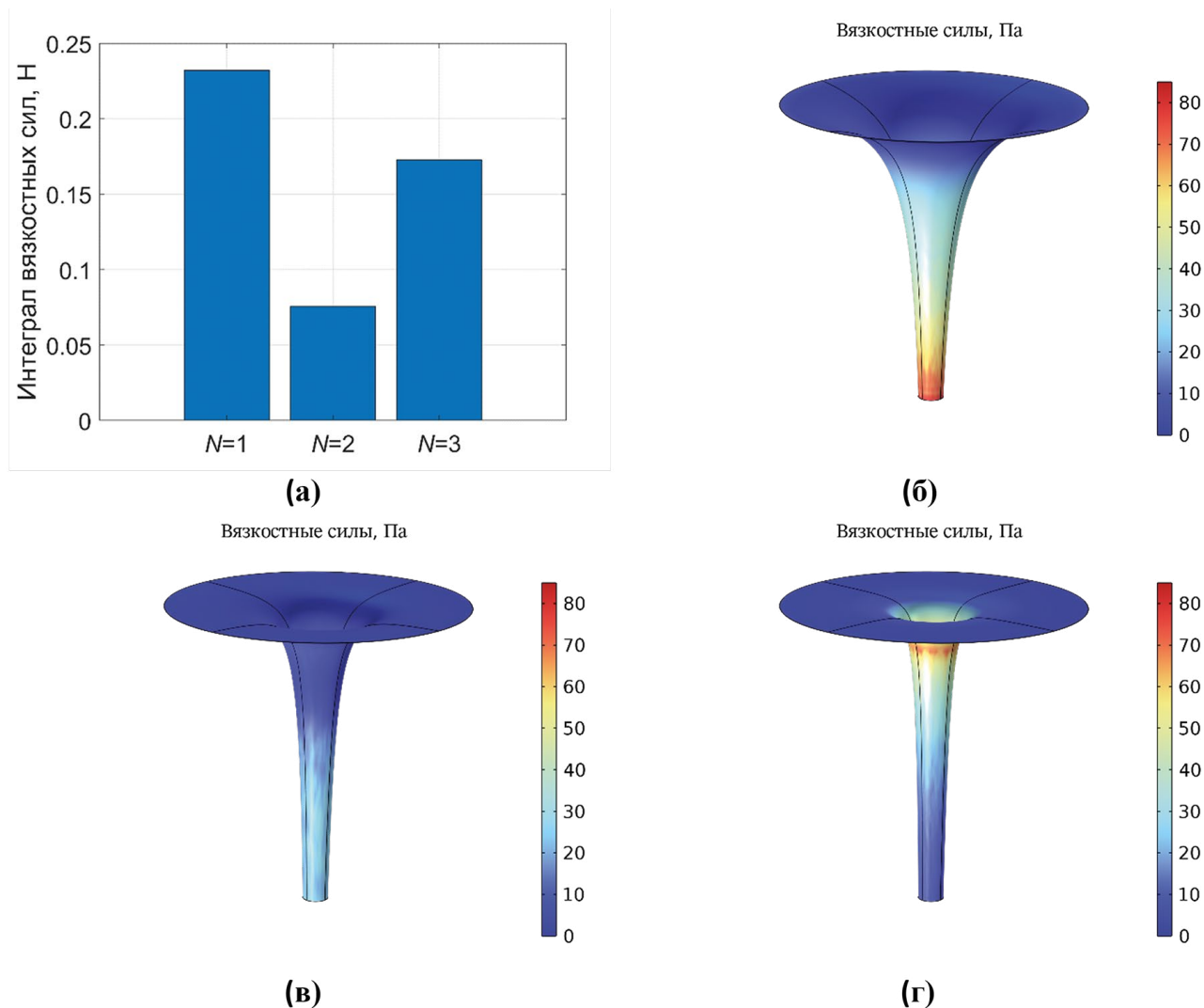


Рис. 10. Интеграл вязкостных сил вдоль обтекаемой поверхности каналов $zR^N = \text{const}$ с показателем степени от 1 до 3 (а), распределения вязкостных сил вдоль обтекаемых поверхностей каналов (б–г). Видно, что в канале с показателем степени $N = 2$ отсутствует явно выраженная область локального максимума вязкостных сил вдоль поверхности канала, а интеграл вязкостных сил минимален из всех рассмотренных случаев.

пленной струи. Это свидетельствует об отсутствии формирования вихревой структуры течения из-за преобладания продольной составляющей скорости на всем протяжении длины канала. В случае показателя степени $N = 3$ вихревое течение формируется, но контактирует со стенками канала в области максимальной кривизны в верхней части системы, что приводит к диссипации вихря, как это видно из рис. 10г.

2. *Влияние вогнутой поверхности на распределение потерь на вязкое трение.* Как было сказано ранее, механизм формирования закрученной струи предполагает наличие вогнутой поверхности в месте зарождения вихря. Поэтому возник вопрос о влиянии формы и размера данной поверхности в основании струи на структуру азимутальной скорости и интегральные потери на вязкое трение.

В связи с тем, что потери на вязкое трение являются минимальными для геометрической конфигурации канала с показателем степени $N = 2$, численное моделирование по анализу влияния вогнутой поверхности проводили только для этого канала. Пример канала с куполом приведен на рис. 11.

Форму вогнутой поверхности задавали посредством выражения в аксиально-симметричной системе координат:

$$z = -a(k, h)r^2 + h,$$

где k — отношение габаритного радиального размера вогнутой поверхности к входному радиусу канала; h — габаритная высота вогнутой поверхности. Коэффициент полинома определяли в соответствии с габаритными размерами.

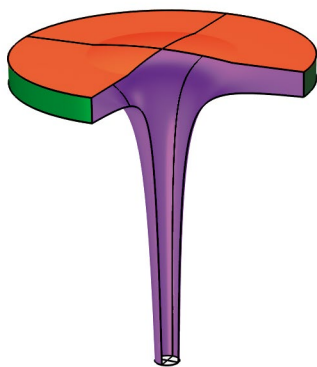


Рис. 11. Пример геометрической конфигурация канала с показателем степени $N = 2$ с вогнутой поверхностью при параметрах габаритной высоты поверхности $h = 5$ мм и отношении габаритного радиального размера вогнутой поверхности к входному радиусу канала $k = 0,5$.

Из приведенных результатов (рис. 12) видно, что при добавлении вогнутой поверхности структура азимутальной скорости меняется. В случае малых размеров поверхности (3 и 5 мм) область вихревого движения расширяется в начале струи, при этом снижается величина азимутальной скорости вдоль струи. Это происходит вследствие контакта со стенками канала в начале струи, что приводит к разрушению вихревой структуры течения.

При увеличении размеров вогнутой поверхности течение сохраняет вихревой характер на всей протяженности струи, а область вихревого течения сильнее расширяется в ее основании. При этом потери на вязкое трение имеют меньшие значения в области зарождения струи, а область максимального контакта вихревого течения со стенками смещается в нижнюю часть канала.

С увеличением размера габаритных размеров вогнутой поверхности возникает тенденция к снижению интегральных потерь на вязкое трение (рис. 13).

Это связано с уменьшением значений локальных потерь на вязкое трение в области формирования вихревого течения и ослаблением взаимодействия закрученной струи со стенками канала.

Таким образом, увеличение размеров поверхности в верхней части канала с показателем степени $N = 2$ способствует уменьшению интегральных потерь на вязкое трение. При стационарных условиях наименьшие потери на вязкое трение достигаются в канале с вогнутой поверхностью высотой 12 мм и отношением радиальных размеров, равных 0.95. Тем не менее, стационарные распределения в канале не могут в полной мере являться аналогией потока крови в системе кровообращения, т.к. в сердечно-сосудистой системе поток является пуль-

сирующим и обладает значительными перепадами давлений. Основной характеристикой течения в таких условиях является распределение сдвиговых напряжений в ядре потока и на его границах. Для определения структуры сдвиговых напряжений задача численного моделирования должна быть решена в динамическом режиме.

3. Анализ сдвиговых напряжений в динамическом режиме. Динамическое моделирование потока состояло в симуляции физиологических перепадов давления на входе в канал аналогично перепадам давления в левом желудочке сердца. В данном случае для этого использовалась функция $P_{in}(t)$, имитирующая систолу сердечного цикла (рис. 14).

Определение структуры сдвиговых напряжений в объеме канала производили согласно выражению

$$F(x, y, z, t) = \mu(x, y, z, t) \gamma(x, y, z, t)$$

где $\mu(x, y, z, t)$ — распределение динамической вязкости жидкости в системе; $\gamma(x, y, z, t)$ — скорость сдвиговых деформаций.

В динамическом режиме сравнивали два геометрических варианта канала $zR^2 = \text{const}$: при наличии вогнутой поверхности с высотой 12 мм и в случае ее отсутствия.

Было получено, что наличие поверхности в основании канала в динамическом режиме снижает максимальное сдвиговое напряжение в потоке вдвое (рис. 15, 16). Из представленной структуры модельного течения видно, что областью максимальных сдвиговых напряжений в канале является стенка в области сужения. В случае отсутствия поверхности повышенные сдвиговые напряжения также локализуются в области формирования струи, что является следствием более высоких значений азимутальной скорости в этой зоне. Очевидно, что уровень сдвиговых напряжений в канале при наличии вогнутой поверхности значительно снижен.

Для более детального анализа влияния сдвиговых напряжений было проведено определение структуры временного интеграла сдвиговых напряжений на протяжении сердечного цикла, которое определяется по формуле

$$F(t) = \int_0^t \mu(r, z) \gamma(r, z) dt.$$

Получено, что в отсутствие поверхности жидкость в пространстве канала испытывает более высокие воздействия со стороны сдвиговых напряжений (двукратное отличие) (рис. 17) на всем течении струи. В случае наличия поверхности основными местами локализации действия сдвиговых

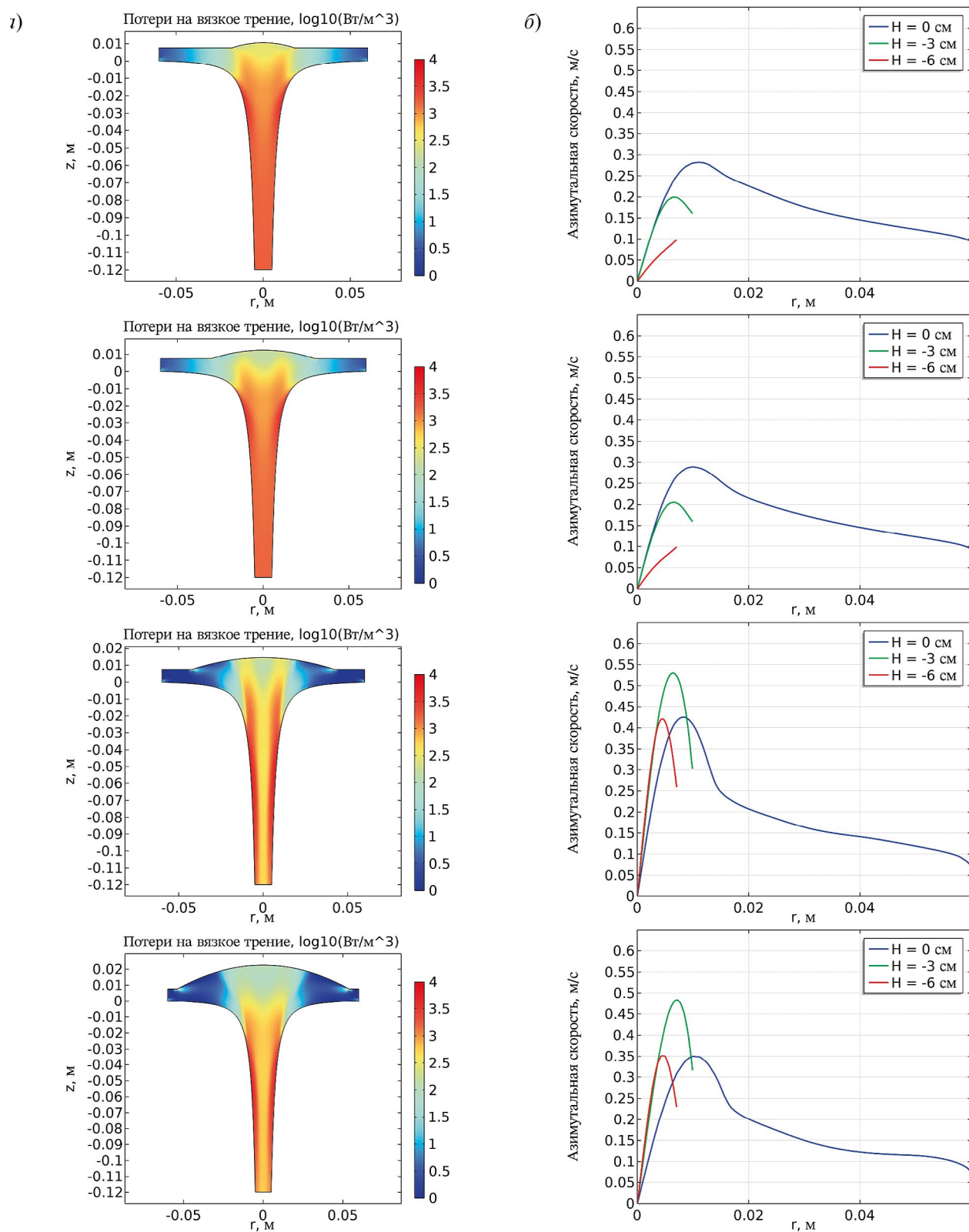


Рис. 12. Распределение потерь на вязкое трение (а) и структура азимутальных скоростей (б) при различных размерах вогнутой поверхности. Видно, что с увеличением добавочного объема, создаваемого вогнутой поверхностью, течение становится вихревым с расширением области формирования вихря, что способствует снижению потерь в этой зоне.

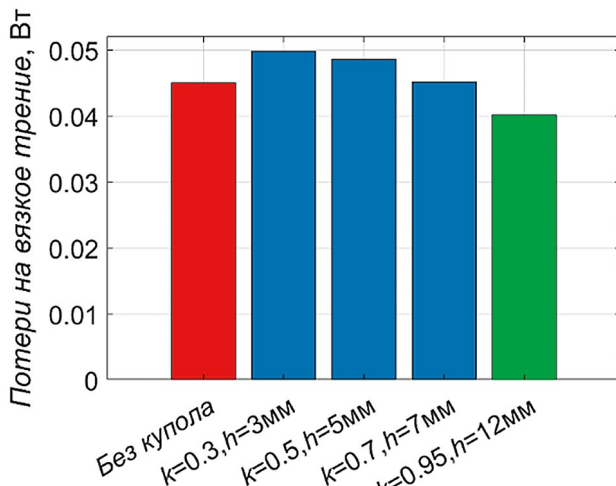


Рис. 13. Удельные потери на вязкое трение при различных габаритных размерах вогнутой поверхности: k — отношение габаритного радиуса вогнутой поверхности к максимальному радиусу канала, h — габаритная высота вогнутой поверхности. Видно, что с увеличением добавочного объема, создаваемого вогнутой поверхностью, интегральные потери на вязкое трение уменьшаются. При максимальном объеме потери на вязкое трение становятся ниже, чем в случае отсутствия вогнутой поверхности.

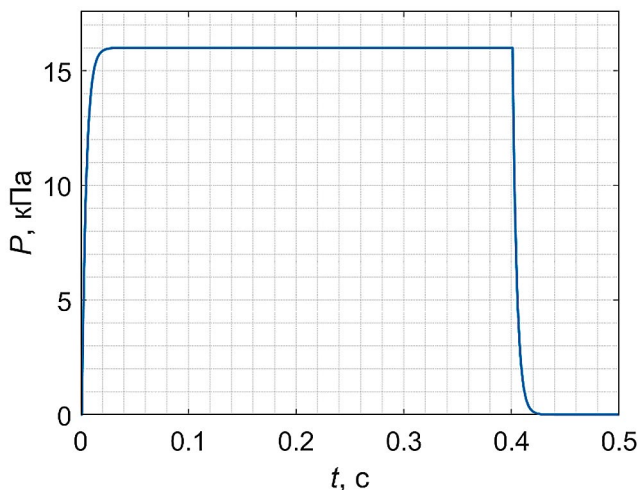


Рис. 14. Расчетная осциллограмма импульса статического давления на входе в канал при динамическом моделировании, имитирующая систолу сердечного цикла.

напряжений являются только пристеночные области в зоне сужения канала.

Таким образом, наличие вогнутой поверхности достаточного объема в канале с продольно-радиальным профилем $zR^2 = \text{const}$ позволяет снизить как максимальные значения сдвиговых напряжений, так и действие сдвиговых напряжений в пространстве канала при имитации сердечного цикла.

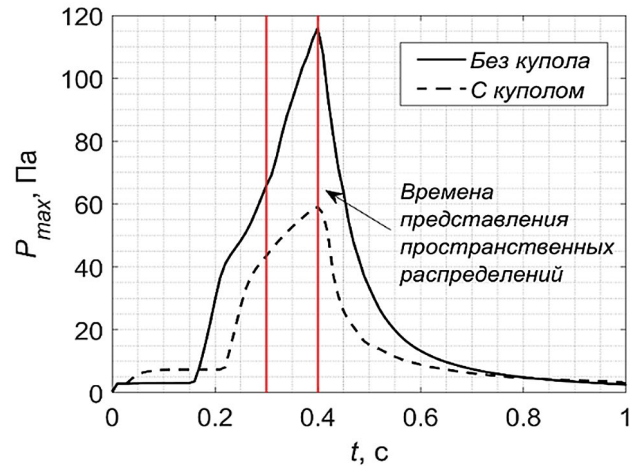


Рис. 15. Значения максимальных сдвиговых напряжений, возникающих в канале второго порядка в зависимости от времени при наличии и в отсутствии вогнутой поверхности максимального объема: сплошная линия — максимальные сдвиговые напряжения в канале без вогнутой поверхности, прерывистая линия — максимальные сдвиговые напряжения в канале при ее наличии. Красными линиями отмечены моменты времени для представления структуры сдвиговых напряжений. Видно, что наличие вогнутой поверхности максимального объема способствует двукратному снижению максимальных сдвиговых напряжений в канале.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Уже на протяжении почти 100 лет известно, что поток крови в сердце и магистральных сосудах имеет закрученный характер, что обусловлено динамическими характеристиками анатомии сердца и сосудов. Однако этот факт известен лишь на феноменологическом уровне. При этом очевидно, что механизм движения крови должен обеспечивать высокие расходные характеристики потока при минимизации потерь на вязкое трение и отсутствии локальных нарушений структуры потока в виде застойных или отрывных явлений.

Ранее было опубликовано, что динамическая пространственная геометрия проточных каналов сердца и аорты в норме может быть аппроксимирована посредством двух поверхностей, соответствующих каналу с продольно-радиальным профилем $zR^2 = \text{const}$ и вогнутой поверхности, вдоль которой кровь поступает в соответствующую полость. В работе проводили экспериментальное и модельное сравнение течения в канале, форма которого соответствует $zR^2 = \text{const}$, и в нескольких каналах, близких к нему по форме, отличающихся показателем степени.

Физический эксперимент при имеющихся измерительных средствах не позволил выявить явных различий между исследуемыми каналами, однако

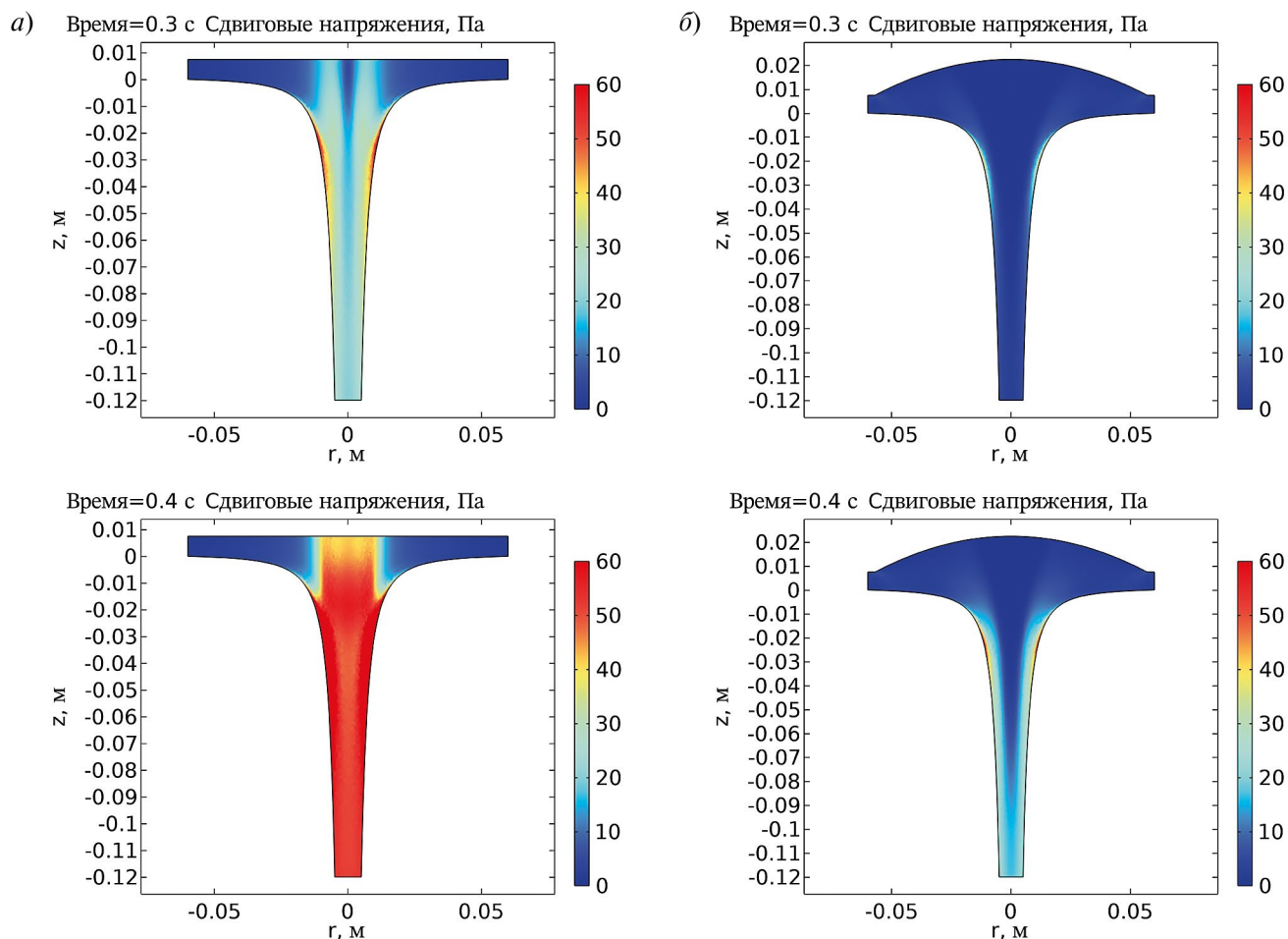


Рис. 16. Значения максимальных сдвиговых напряжений, возникающих в канале второго порядка в зависимости от времени при наличии и в отсутствие вогнутой поверхности максимального объема: сплошная линия — максимальные сдвиговые напряжения в канале без вогнутой поверхности, прерывистая линия — максимальные сдвиговые напряжения в канале при ее наличии. Красными линиями отмечены моменты времени для представления структуры сдвиговых напряжений. Видно, что наличие вогнутой поверхности максимального объема способствует двукратному снижению максимальных сдвиговых напряжений в канале.

позволил осуществить валидацию численной модели посредством совпадения расходных характеристик и форм линий тока при равных условиях.

Численное моделирование, в свою очередь, показало, что канал, обеспечивающий минимум интегральных потерь на вязкое трение, соответствует продольно-радиальному профилю $zR^2 = \text{const}$, а течение, формируемое в канале данной формы, носит вихревой характер. Это подтверждено при симуляции пульсирующего закрученного течения в диапазоне давлений, действующих в сердце и аорте. При этом показано, что наличие вогнутой поверхности, обеспечивающей достаточный дополнительный объем, обеспечивает как преимущества в отношении минимизации потерь на вязкое трение, так и снижение интегральных сдвиговых напряжений при более равномерном распределении поля сдвиговых напряжений в канале.

Снижение сдвиговых напряжений обеспечивает условия для стабильного состояния биологически активных элементов крови и стенок проточного канала. Уровень сдвиговых напряжений, действующих в потоке этого типа существенно ниже величин, при которых происходят активация и повреждение форменных элементов крови и эндотелия [19, 20], что создает достаточный компенсаторный резерв, необходимый при развитии патологических состояний. Однако при возникновении серьезных нарушений динамической геометрии проточного канала (напр., стеноз или недостаточность клапанов сердца, установка протеза клапана, нарушение локальной сократимости сердечной стенки, нарушения ритма, изменение упруго-деформационных свойств стенки проточного канала сердца и аорты и т.д.) сдвиговые напряжения могут достигать высоких значений и усугублять состояние кровообращения.

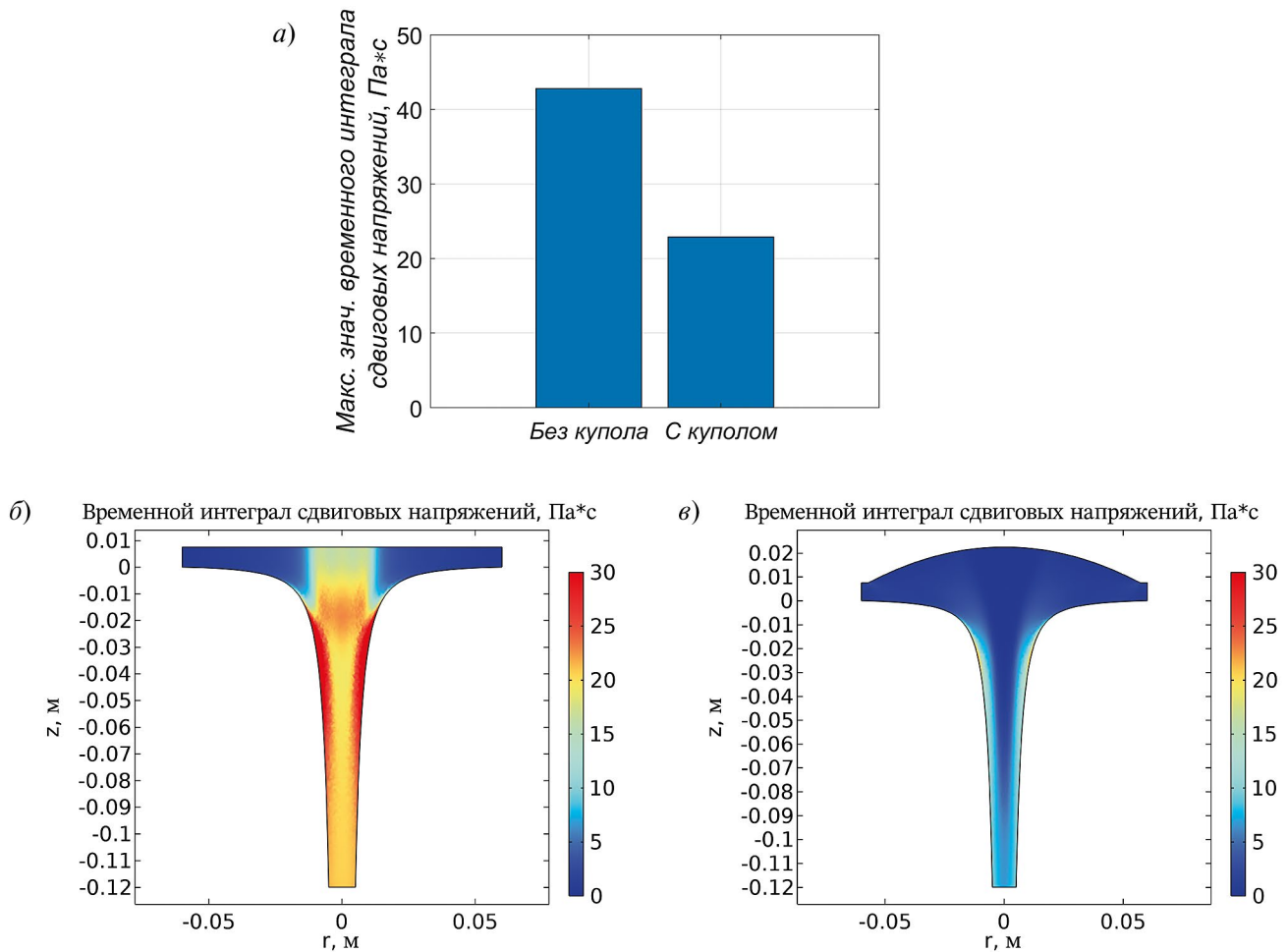


Рис. 17. Максимальные значения временных интегралов сдвиговых напряжений в каналах при наличии и при отсутствии вогнутой поверхности (а), структура интеграла действия сдвиговых напряжений в этих каналах (б, в). Видно, что наличие вогнутой поверхности позволяет снизить воздействие сдвиговых напряжений в два раза в пристеночной зоне, а такжекратно снижает их действие в области формирования вихревого движения.

Следует упомянуть, что полученные величины потерь являются малой величиной в сравнении с общей мощностью массопереноса жидкости. В настоящей работе величина потерь на вязкое трение использовалась только для сравнительного анализа. Тем не менее в аппроксимируемой динамической геометрии сердечно-сосудистой системы потери на вязкое трение могут быть существенно выше, так как действительная физиологическая система функционирует в значительно более широком диапазоне давлений. Сохранение преимуществ вихревого характера при более высоких давлениях совместно с учетом динамического характера течения является целью дальнейшей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании гидродинамических экспериментов и численного моделирования закрученного потока в каналах простой геометрической формы, соответствующей функциям, аппроксимирующим форму

анатомических проточных каналов сердца и аорты, показано, что развитая вихревая структура потока поддерживается только в каналах, вдоль которых выполняется соотношение $zR^2 = \text{const}$. Если такой канал дополнен вогнутой обтекаемой поверхностью в основании (при z , близком к 0), при закрученном режиме течения среды достигается минимум интегральных вязких потерь, а в динамическом режиме — двукратное снижение пиковых и интегральных сдвиговых напряжений. Это говорит о том, что закрученная структура потока существенно увеличивает диапазон объемной скорости крови, при которой выполняются условия физиологической стабильности биологически активных клеточных и белковых компонентов крови и эндотелиальной выстилки каналов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-15-00148).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ И СТАНДАРТОВ

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева” Минздрава России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frazin L.J., et al.* Confirmation and initial documentation of thoracic and abdominal aortic helical flow. An ultrasound study // *ASAIO Journal* (American Society for Artificial Internal Organs: 1992). 1996. Т. 42. №. 6. С. 951–956.
2. *Gorodkov A., Dobrova N.B., Kuzmina N.B., et al.* Anatomical structures determining blood flow in the heart left ventricle // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 1996. V. 7. № 3. P. 153–160.
3. *Жоржوليани Ш.Т., Миронов А.А., Талыгин Е.А. и др.* Анализ динамической геометрической конфигурации проточного канала аорты с позиций смерчевой самоорганизации потока крови // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2017. Т. 164. № 10. С. 519–524.
4. *Кикнадзе Г.И. и др.* О структуре потока в левом желудочке сердца и аорте с применением точных решений нестационарных уравнений гидродинамики и морфометрических исследований // *Докл. АН*. 1996. Т. 351. №. 1. С. 119.
5. *Bockeria L.A., Gorodkov A.Y., Kiknadze G.I., Gachechiladze I.A.* Application of Tornado-flow fundamental hydrodynamic theory to the study of blood flow in the heart – Further development of Tornado-like jet technology // *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011, Denver, CO, 11–17 ноября 2011 г.* V. 2. Denver, CO, 2011. P. 287–296.
6. *Талыгин Е.А., Зазыбо Н.А., Жоржوليани Ш.Т. и др.* Количественная оценка состояния внутрисердечного потока крови по динамической анатомии левого желудочка сердца на основании точных решений нестационарных уравнений гидродинамики для класса смерчеобразных потоков вязкой жидкости // *Успехи физиологических наук*. 2016. Т. 47, № 1. С. 48–68.
7. *Zhorzholiani S.T., Talygin E.A., Krashennnikov S.V., et al.* Elasticity Change along the Aorta is a Mechanism for Supporting the Physiological Self-organization of Tornado-like Blood Flow // *Human Physiology*. 2018. V. 44. № 5. P. 532–540.
8. Г.И. Кикнадзе, Ю.К. Краснов. Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости // *Докл. АН СССР*, 290:6 (1986). 1315–1319.
9. *Burgers J.M.* A mathematical model illustrating the theory of turbulence // *Advances in applied mechanics*. 1948. Т. 1. С. 171–199.
10. *Кикнадзе Г.И., Талыгин Е.А., Городков А.Ю.* Патент № 2691705 С1 Российская Федерация, МПК F15D 1/00. Способ отсасывания пограничного слоя сплошной среды с поверхности тела и устройство для его реализации : № 2018119493 : заявл. 28.05.2018 : опубл. 17.06.2019
11. *Пиралишвили Ш.А., Писаревский А.С.* Численное моделирование вихревого эффекта в несжимаемой жидкости // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2013. №. 3. С. 138–147.
12. *Гайфуллин А.М., Жвик В.В.* Взаимодействие двух противоположно закрученных затопленных струй // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2019. № 3. С. 48–57.
13. *Платонов Д.В., Минаков А.В., Дектерев А.А., Сентябрьков А. В.* Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2013. Т. 5. № 4. С. 635–648.
14. *Высотина В.Г.* Структура закрученного течения в осесимметричных каналах // *Матем. моделирование*. 2003. Т. 15. № 1. С. 69–77.
15. *Shipkowitz T., et al.* Numerical study on the effect of steady axial flow development in the human aorta on local shear stresses in abdominal aortic branches // *Journal of biomechanics*. 1998. Т. 31. №. 11. С. 995–1007.
16. *Wilcox D.C.* Formulation of the kw turbulence model revisited // *AIAA journal*. 2008. Т. 46. №. 11. С. 2823–2838.
17. *Versteeg H.K., Malalasekera W.* An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. – Pearson education, 2007.
18. *Митрофанова, О.В.* Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями. // *Теплофизика высоких температур*. 2003. Т. 41. № 4. С. 587–633.
19. *Brown C.H., et al.* Morphological, biochemical, and functional changes in human platelets subjected to shear stress // *The Journal of laboratory and clinical medicine*. 1975. Т. 86. – №. 3. С. 462–471.
20. *Sutera S.P.* Flow-induced trauma to blood cells // *Circulation research*. 1977. Т. 41. №. 1. С. 2–8.

EXPERIMENTAL AND MODEL STUDY OF SWIRLING FLUID FLOW IN A CONVERGING CHANNEL AS A SIMULATION OF BLOOD FLOW IN THE HEART AND AORTA

Ya. E. Zharkov, Sh. T. Zhorzholiani, A. A. Sergeev, A. V. Agafonov, A. Y. Gorodkov[#]
Academician of the RAS L. A. Bockeria

A. N. Bakulev National Medical Research Center for Cardiovascular Surgery, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: agorodkov@bk.ru

The study of swirling flows in channels corresponding to the static approximation of flow channels of the heart and major vessels with a longitudinal-radial profile $zR^2 = \text{const}$ and a concave streamlined surface at the beginning of the longitudinal coordinate has been carried out. A comparative analysis of the flow structure in channel configurations $zR^N = \text{const}$, where $N = -1; 1; 2; 3$, in the absence and presence of a concave surface was carried out. The numerical modelling was compared with the results of hydrodynamic experiments on the flow characteristics and the shape of the flow lines. The numerical model was used to determine the velocity structure, viscous friction losses and shear stresses. Numerical modelling of steady-state flows for channels without a concave surface showed that in the channel $zR^2 = \text{const}$ there is a stable vortex flow structure with the lowest viscous friction losses. The presence of a concave surface of sufficient size significantly reduces viscous friction losses and shear stresses in both steady state and pulsed modes.

Keywords: vortex flows, flow channel shape, heart and vessel shape approximation, swirling blood flow, viscous friction losses, shear stress.