

**Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)**

На правах рукописи

Балабина Татьяна Юрьевна

**СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКА ПОРИСТЫМИ
ВСТАВКАМИ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ КОНТУРЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

**Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Дерюгин Юрий Николаевич**

Саров, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Постановка задачи и метод численного анализа	16
1.1 Введение.....	16
1.2 Постановка задачи.....	16
1.3 Подходы к моделированию течений в каналах с пористыми вставками.....	19
1.4 Физические свойства пористых сред.....	22
1.4.1 Пористость.....	24
1.4.2 Проницаемость.....	26
1.4.3 Извилистость.....	27
1.4.4 Характерный размер поры.....	30
1.5 Модели пористых сред.....	31
1.5 Математическая модель для описания турбулентных и фильтрационных течений.....	33
1.6 Математическое моделирование течений в пористых структурах.....	39
1.6 Вывод по первой главе.....	41
Глава 2 Исследование течения в канале с коленом.....	43
2.1 Введение.....	43
2.2 Постановка задачи.....	43
2.3 Сеточные модели, подходы и методы решения, используемые для моделирования.....	44
2.4 Результаты численного моделирования на основе RANS подхода.....	46
2.5 Результаты численного моделирования на основе вихререзающего подхода.....	53
2.6 Оценка влияния колена на однородность течения.....	57
2.7 Вывод по второй главе.....	70
Глава 3 Численное моделирование характеристик газодинамических течений в открытопористой структуре.....	71
3.1 Введение.....	71
3.2 Постановка задачи.....	71
3.3 Построения микромоделей пористой вставки.....	73
3.3.1 Объект исследования.....	74

3.3.2 Методика анализа погрешности геометрической модели для исследования на микроуровне	75
3.3.3 Результаты анализа	79
3.4 Построения сеточной модели для расчетов течений на микроуровне	84
3.5 Исследование мелкомасштабных пульсаций скорости на микроуровне в следе за пористой вставкой	87
3.6 Численное моделирование спутного следа за пористой вставкой	94
3.7 Численное моделирование структуры потока с пористой вставкой на макроуровне	98
3.8 Исследование диффузионного перемешивания потоков на микроуровне в пористой вставке	102
3.9 Выводы по третьей главе	112
Глава 4 Расчетная технология полномасштабного моделирования течения в тракте проточного лазера с пористыми вставками	114
4.1 Введение	114
4.2 Описание расчетной технологии	114
4.3 Применение расчетной технологии для описания течения в конструкции теплообменника	116
4.3.1 Постановка задачи	116
4.4 Результаты численного исследования	120
4.5 Вывод по четвертой главе	125
Заключение	127
Работы автора по теме диссертации	129
Список сокращений и условных обозначений	132
Список литературы	136

Введение

Актуальность:

В последнее время исследования в области лазерной техники представляют большой интерес. Нарастание мощности лазерного излучения, получение рекордных показателей по КПД, в том числе и оптимизация массогабаритных характеристик, приводит к тому, что решение априорных вопросов в лазерных системах становятся крайне актуальными. При этом вопросы, касающиеся развития лазерного направления, основываются как на задачах, в решении которых газодинамики накопили огромный опыт, так и выдвигается целый ряд новых проблем [1].

По типу активной среды лазеры можно разделить на твердотельные, жидкостные и газовые [2, 3]. В жидкостных и газовых лазерах, как правило, применяется проточная активная среда, в которой и создается инверсная населённость. С увеличением мощности лазеров с замкнутым циклом потока возрастает роль газо- гидродинамического контура. Подходы к его конструированию являются различными и зачастую не соответствуют достижению желаемых выходных параметров. Контур имеет либо высокие габаритные удельные объемы и низкие удельные затраты мощности на поддержание циркуляции газа по замкнутому контуру, либо высокие удельные затраты мощности и относительно низкие габаритные удельные объемы [4, 5, 6]. Организация замкнутого контура для активной среды должна быть устроена таким образом, чтобы реализовывалась минимальная неоднородность потока в зоне генерации [7, 8]. Неоднородность оптических характеристик активной среды приводит к локальным изменениям волнового фронта световой волны при ее прохождении через активную среду. Причинами изменения фазы является неоднородность потока, обусловленная как конструктивными элементами канала, так и внешним воздействием. Основными причинами воздействия являются конструкционные элементы в виде насосов, поворотов, переходов и т.д.

В условиях ограничения массы и габаритов устройства возникает необходимость выравнивания потока на возможно меньшем расстоянии от места возмущения на малых размерах порядка нескольких характерных размеров канала (как правило за характерный размер принимают реальные измерения конструкции такие как диаметр трубы, ширина канала, диаметр проволоки, номинальный размер стороны ячейки в свету и т.д.). В качестве одного из возможных способов выравнивания профиля скорости потока могут быть использованы вставки конструктивных элементов из открытопористых материалов [9].

Наибольший интерес представляют материалы с высокой пористостью в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления.

Таким образом, важной задачей является разработка способов нивелирования неоднородностями потока от конструктивных элементов, которые формируются попадают в зону генерации. Одним из таких способов, который рассматривается в данной работе является применение открытопористой структуры.

Степень разработанности темы диссертации:

Рассматривая задачу выравнивания профиля скорости потока, следует учитывать, что каждый источник генерации возмущений порождает определенный вид неоднородности. Таким образом, первоочередной задачей в решении поставленной задачи является получение представления о формировании той или иной неоднородности, которая порождается характерными элементами конструкции, и на какое расстояние оказывает свое влияние на структуру потока.

Накопленный опыт по исследованию лазерной тематики обобщён в ряде монографий [1, 2, 10 и др.]. Основной акцент сделан на обзор общих принципов построения. Однако, возникающие вопросы по организации газодинамического контура напрямую относятся к лазерной газовой динамике и освещение этих вопросов практически не встречается. В настоящей монографии [1] систематизирована лишь небольшая часть опубликованных результатов, находящиеся вне поля зрения газодинамиков. В то же время исследованиями конкретных вопросов занимались многие газодинамики и внесли ощутимый вклад в эту новую науку.

Исследования по формированию потока в криволинейном канале датируются первой половиной XX столетия. Этим вопросом занимались К. М. Уайт [11], М. Адлер [12], Г. Нипперт [13], Г. Рихтер [14], В. Р. Дин [15]. Повороты каналов (так называемое «коллено») являются важной частью любой трубопроводной конструкции, поскольку они обеспечивают гибкость системы. Исследования течения в колене имеют большое значение для понимания и улучшения их характеристик и минимизации потерь. Хорошо известно, что течение несжимаемых вязких жидкостей в криволинейных каналах характеризуется не стационарностью, отрывом потока, приводящее к образованию вторичного течения, которые зависят от числа Re , а также радиуса кривизны поворота канала. Ряд

исследователей занимались вопросом развитием турбулентности в криволинейном канале с помощью теоретических, экспериментальных и численных методов [16-19]. Очень полезная база данных для прямого численного моделирования (DNS) и моделирования больших вихрей (LES) в колене предоставлена двумя исследованиями [20, 21]. В работе [22] представлено краткое представление о предыдущих исследовательских работах с анализом параметров, влияющих на структуру потока в колене под углом 90° .

Качество лазерного излучения напрямую зависит от оптических неоднородностей, которые формируются из многих факторов. Для проточных лазеров одним из таких факторов является качество прокачиваемой среды. В работах [23, 24] показано влияние турбулентных пульсаций газового потока на характеристики волнового фронта и угловую расходимость излучения. Показано, что с усилением турбулентности распределение поля на зеркале выглаживается, а угловая расходимость возрастает. В условиях, когда угловая расходимость определяется турбулентными эффектами, величина расходимости растет также с ростом волнового числа. С помощью численного моделирования в работе [25] демонстрируется влияние тепловой нагрузки при прохождении потока после поворота в лазерной кювете.

При конструировании канала для прокачки активной среды уделялось внимание вопросу минимизации турбулентности в потоке. Наиболее распространенным видом конструкции ликвидации турбулентности использовался сопловой аппарат, который делил канал на части, тем самым распределяя поток равномерно по сечению и рассеивая турбулентные пульсации больших масштабов. В работе [26] показано, что мелкомасштабные пульсации, образующиеся после конструкции из плоскопараллельных пластин, которые используются в качестве устройства по выравниванию профиля скорости потока, приводят к изменению интерферометрической картины излучения, что приводит к рефракционным потерям излучения.

В настоящее время численное моделирование становится базовым методом в науке и производстве. Безусловно, оно имеет ряд преимуществ, как в изучении какого-либо физического процесса, так и в разработке конкретного изделия. Сейчас существует большое количество программных комплексов для решения конкретных инженерных задач. Благодаря постоянно возрастающей вычислительной мощности ЭВМ, методов распараллеливания задач, расчет сложных изделий занимает все меньше времени. Однако до сих пор

полное описание системы не всегда является возможной из-за построения математической модели, ограничения аппаратных ресурсов и временных затрат, которые потребуются на расчет такой системы. В то же время построение полномасштабного экспериментального макета зачастую приводит к еще большим затратам. И здесь наиболее выгодно выступает симбиоз расчетных методик и верификационных экспериментов.

Цель диссертационной работы:

Целью диссертационной работы является исследование структуры потока в типичных элементах конструкции газового лазера замкнутого цикла с применением открытопористых структур для минимизации неоднородностей в течении на рабочих участках.

Для достижения цели автором необходимо было решить следующие **задачи**:

1 На основе обзора литературы по проблемам газодинамических лазерных установок и методам моделирования течения в каналах сформулировать математические постановки задач для описания турбулентного течения в каналах с открытопористыми структурами. Рассмотреть вопросы о методах для снижения неоднородностей в газодинамическом контуре.

2 Провести численные исследование влияния характерных элементов конструкции проточного лазера с замкнутым циклом на структуру течения с применением различных подходов описания турбулентности. Выполнить сопоставления численных результатов с данными эксперимента. Сделать оценку влияния характерных элементов конструкции на однородность течения.

3 Рассмотреть вопрос выравнивания профиля скорости потока с помощью открытопористой структуры. Исследовать течение газа в пористой вставке на микроуровне. Сделать обзор возможных принципов построения цифровых моделей пористой вставки в микромасштабе с оценкой качества полученных моделей. На основании численного эксперимента определить характеристики пористой среды для моделирования в макромасштабе.

4 Разработать расчетную технологию полномасштабного моделирования течения в канале проточного лазера с пористыми вставками.

Научная новизна работы

1 Установление стохастического характера течения на основании моделирования вихреразрешающей моделью турбулентности, при этом осредненные параметры, соответствуют решению, полученному на основании численного моделирования по RANS подходу и осредненным значениям экспериментальных данных.

2 На основании численного моделирования установлено, что порожденное поле завихренности за коленом сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы и при прохождении 60% поворота канала формируется вторичное течение, которое оказывает влияние на основной поток на расстоянии равном 45 диаметрам трубы.

3 Предложено использование открытопористой структуры высокой пористости для снижения уровня завихренности. На основании численного моделирования подтверждено, что с использованием пористой вставки за коленом уровень завихренности резко снижается до уровня однородного потока на расстоянии менее одного диаметра трубы в диапазоне скоростей от 5 до 30 м/с. Результаты численного исследования подтверждены экспериментальными данными.

4 В результате численного исследования установлено, что открытопористая структура формирует пульсации, которые характеризуются размером пор, носят низкочастотный характер и затухают на расстоянии 6 диаметров поры. Крупные возмущения потока, обусловленные геометрией канала, гасятся на расстоянии 5 диаметров трубы.

5 Результаты проведенных исследований использовались в разработке и оптимизации элементов конструкции проточных газовых лазерах с замкнутым циклом, что позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики конструкции газодинамического лазера.

Положения, выносимые на защиту

1. С применением разработанного вихреразрешающего подхода установлен стохастический характер течения за коленом, при этом осредненные параметры показывают формирования двух зеркально симметричных вихревых структур, что согласуются с решением, полученному по RANS подходу.

2. Получены параметры вторичного течения в канале с коленом и определено его влияние на основной поток в диапазоне скоростей от 5 до 30 м/с.

3. Предложено и теоретически обосновано применение в газодинамический контур открытопористой вставки высокой пористости для выравнивания профиля скорости газодинамического потока. На данное устройство получен патент.

4. На основе моделирования течения на микроуровне проведена оценка неоднородностей потока, порождаемых открытопористой вставкой. Определены параметры фильтрационной макромоделей Форхгеймера-Бринкмана и эффективного коэффициента диффузии для полномасштабного моделирования течения в газодинамическом тракте газового лазера.

5. Создана расчетная технология для описания влияния различных конструктивных элементов на пульсационные характеристики потока в полномасштабной установке газодинамического контура газового лазера.

Практическая значимость работы

Практическая значимость полученных автором результатов заключается в следующем:

Полученные результаты исследования использовались в разработке газовых проточных лазерах с замкнутым циклом. Результаты численного моделирования использовались для оптимизации отдельных элементов конструкции. На основе результатов моделирования течения через пористую вставку предложена конструкция выравнивания потока, на которую получен патент [СР1].

Разработана расчетная технология исследования структуры газодинамического потока с позиции влияния конструктивных элементов на пульсационные характеристики среды. Технология применяется для оптимизации конструкций лазерных систем и описания структуры течения во всем тракте.

Построенные цифровые модели ОПС используются как прототипы для исследования в рамках цифровых экспериментов для изучения различных показателей потока через пористые вставки.

Результаты численного моделирования течения в конструктивных элементах и пористых вставках могут быть использованы при разработке теплообменного, массообменного оборудования атомных и тепловых электростанций, химических производств.

Полученные результаты используются в научно-исследовательской работе в рамках программы "Лаборатория молодых ученых" Министерства образования и науки РФ (задание № FSWE-2024-0003) при финансовой поддержке Национального проекта "Наука и университеты", а также в других исследовательских проектах, выполняемых при участии автора диссертации.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»:

- в работе исследуются турбулентные потоки внутри канала, математическая модель которых строится на системе уравнений Навье-Стокса с применением RANS моделей турбулентности и вихреразрешающего подхода моделирования турбулентности, что соответствует пункту 4 «ламинарные и турбулентные течения»;

- адаптировано применение разномасштабных вычислительных экспериментов: с целью получения эмпирических зависимостей описания пористой вставки проводятся исследования течения газа через пористую структуру «впрямую» на микромодели, в дальнейшем полученные коэффициенты участвуют в полномасштабном моделировании, где пористая вставка описывается математической моделью. Данное направление работы соответствует пункту 8 «течение жидкостей и газов в пористых средах»;

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений, выводов и результатов, приведенных в работе, обусловлено использованием математических моделей на основе системы полных уравнений Навье-Стокса, базирующихся на фундаментальных законах механики сплошной среды, многократно апробированных вычислительных методов для численного моделирования структуры течений, а также системных сопоставлений с экспериментальными данными, с результатами, полученными другими авторами, и с результатами расчетов на различных сетках.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах и получили положительную

оценку:

- 1 XVI Научно-техническая конференция «Молодежь в науке» (Саров, 2017).
- 2 XXII Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики», посвященной памяти К.И. Бабенко (Дюрсо, 2018).
- 3 Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2022» в рамках XXIX Международного научного молодежного форума «Ломоносов - 2022» (Саров, 2022).
- 4 X Международная научная молодежная школа-семинар «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» имени Е.В. Воскресенского (Саранск, 2022).
- 5 Рабочий семинар для студентов МГУ (филиал в г. Саров) (Саров, 2022).
- 6 XVI Международная научная конференция Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании (Саранск, 2023).
- 7 XIV Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2023).
- 8 II Всероссийская школы семинара Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов и молодых ученых и специалистов «Математическое моделирование на Супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности» (Саров, 2023).
- 9 IX Международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Нижний Новгород, 2023).
- 10 10-я Российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике» (Светлогорск, 2024).
- 11 Конференция «Вычислительная классическая и многофазная гидродинамика и термомеханика сплошной среды» (Сириус, 2024).
- 12 III Всероссийская школы семинара Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов и молодых ученых и специалистов «Математическое моделирование на Супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности» (Саров, 2024).
- 13 XVII Международная научная конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» (Саранск, 2025).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 13 работах, из которых 3 — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science) [CB1-CB3], 9 — в сборниках трудов конференций [TK1-TK9], 1 статья в прочих изданиях [СП1], получено 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение [CP1].

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

1. непосредственном участии в постановке основных задач по теме исследования диссертации;
2. проведении всех численных исследований структуры потоков проектируемых конструкций начиная с формулировки математической задачи, построения расчетной и сеточных геометрий, подготовкой начальных и входных данных, проведением расчетов с последующей обработкой и интерпретацией полученных результатов;
3. непосредственном участии в постановке верификационных экспериментов, обсуждении полученных результатов и сопоставлении их с расчетными данными, калибровки расчетной технологии моделирования структуры течения в канале по экспериментальным данным;
4. апробации результатов исследования и подготовки материалов для публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы

Полный объем работы диссертации составляет 148 страниц, включая 80 рисунков и 4 таблицы, ссылается на 140 источников.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности темы, формулируются основные цели и задачи исследования.

В первой главе представлена постановка задачи исследования, направления исследований и обзор литературы по теме диссертации, включающий описание различных подходов к моделированию нестационарных течений в канале, в том числе и с пористыми вставками. Представлено описание основных уравнений газовой динамики (системы

уравнений Навье-Стокса), описание наиболее часто используемых моделей турбулентности, которыми замыкается система, SA и SST. Рассмотрены RANS и вихреразрешающий подходы к моделированию турбулентных течений. Приводятся свойства пористых сред и их зависимости. Рассмотрены различные подходы к моделированию течений в пористых вставках. Показаны особенности модификации уравнений для расчета течения в пористой вставке.

Во второй главе приводятся результаты численного исследования структуры турбулентных потоков в основном конструкционном элементе, которым является поворотное колено с углом 90 градусов. Для него построены сеточные модели, отвечающие подходам моделирования турбулентности: подходы, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности, а также вихреразрешающий, в частности, метод моделирования крупных вихрей (LES). Расчеты течений были выполнены как в стационарной, так и нестационарной постановках в комплексе «ЛОГОС» [27, 28] на суперкомпьютере в параллельном режиме вычислений. Из анализа полученных результатов делается вывод о том, что осредненные параметры потока в нестационарной постановке с использованием зонного RANS-LES перехода в модели турбулентности [29] качественно и количественно лучше совпадает с экспериментальными данными, чем результаты стационарных расчетов, основанные на использовании RANS подхода. Верификация численной методики проводилась экспериментальными данным, которые были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. П.Е. Алексеева [30]. Количественным критерием влияния конструкционных изменений на однородность потока является уровень завихренности.

Во третьей главе представлены результаты исследования течения на микроуровне в каналах с пористыми вставками. Объектом исследования стал фрагмент пористой структуры из сетчатого материала типа ПСМ. Приведены принципы построения геометрической модели пористой структуры, а также оценка неоднородности образца. Моделирование на микроуровне позволило получить фильтрационные характеристики пористой вставки. Эти характеристики использованы для описания модели на макроуровне. Проведена оценка формирующихся пульсаций, которые порождаются за пористой структурой, и их затухание с использованием спектрального анализа возмущений. Показана применимость полученных характеристик пористой вставки на микромодели в полномасштабных

расчетах макромоделей с применением описания модели пористой вставки на основе уравнений Форхгеймера-Бринкмана. Рассмотрено влияние пористого тела на диффузионное перемешивание двух компонент потока на микроуровне.

В четвертой главе описывается технология моделирования течения в газовых проточных лазерах с пористыми вставками, которая интегрирует совокупностью всех рассмотренных в диссертации задач. На примере конструкции теплообменника проточного газодинамического лазера с пористой вставкой и без нее показано применение расчетной технологии. Полученные данные численного моделирования для разных чисел Рейнольдса верифицируются экспериментальными данными. Экспериментальные данные для расчета также были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [30].

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе, указаны перспективы применения результатов.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность генеральному конструктору по лазерным системам, заместителю директора РФЯЦ-ВНИИЭФ по лазерно-физическому направлению, директору ИЛФИ, д. ф.-м. н., академику РАН Гаранину Сергею Григорьевичу за постановку задачи, проявленный интерес к исследованию и поддержку работы.

Автор благодарит заместителя директора РФЯЦ-ВНИИЭФ, заместителя научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, первого заместителя директора ИТМФ – начальника научно-исследовательского отделения, д. ф.-м. н., член-корреспондента РАН Шагалиева Рашида Мирзагалиевича за поддержку и обеспечение работ по теме диссертации.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д. ф.-м. н. Дерюгину Юрию Николаевичу и наставнику Кудряшову Евгению Александровичу за постоянное внимание, поддержку и консультации при выполнении работы.

Автор благодарит коллег математического отделения д.ф.-м. н. Козелкова А.С., к.т.н. Жучкова Р.Н., к.ф.-м.н. Зеленского Д.К., к.ф.-м.н. Уткину А.А. за конструктивную критику и содержательные предложения, методическую поддержку по расчетной части диссертации.

Автору приятно поблагодарить главного научного сотрудника ИЛФИ д.ф.-м.н. Качалина Г.Н. за поддержку данного исследования и инициирования совместных работ с

НГТУ им. Р.Е. Алексеева и коллег Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева к.т.н. Хробостова А.Е., к.т.н. Легчанова М.А., Доброва А.А. за проведение верификационных экспериментов по теме диссертации.

Благодарю моих друзей и родственников за веру в достижение поставленной цели.
Благодарю свою собаку Чарли, что верно и преданно ждал меня дома.

Глава 1 Постановка задачи и метод численного анализа

1.1 Введение

Данная глава является вводной. В данной главе диссертации автором представлена постановка задачи, направления исследований и обзор литературы по теме диссертации включающих описание различных подходов к моделированию нестационарных течений в канале, в том числе и с пористыми вставками. Представлено описание основных уравнений (системы уравнений Навье-Стокса), описание наиболее часто используемых моделей турбулентности, которыми замыкается система, SA и SST. Автором рассмотрены RANS и вихререзающие подходы к моделированию турбулентных течений. Приводятся свойства пористых сред. Рассмотрены различные подходы к моделированию течений в пористых вставках. Показаны особенности модификации уравнений для расчета течения в пористой вставке.

1.2 Постановка задачи

На рисунке 1.1 приведена упрощенная схема проточного лазера с замкнутым циклом [7, 8]. На рисунке показаны ключевые компоненты лазера – камера резонатора, теплообменник и компрессор.

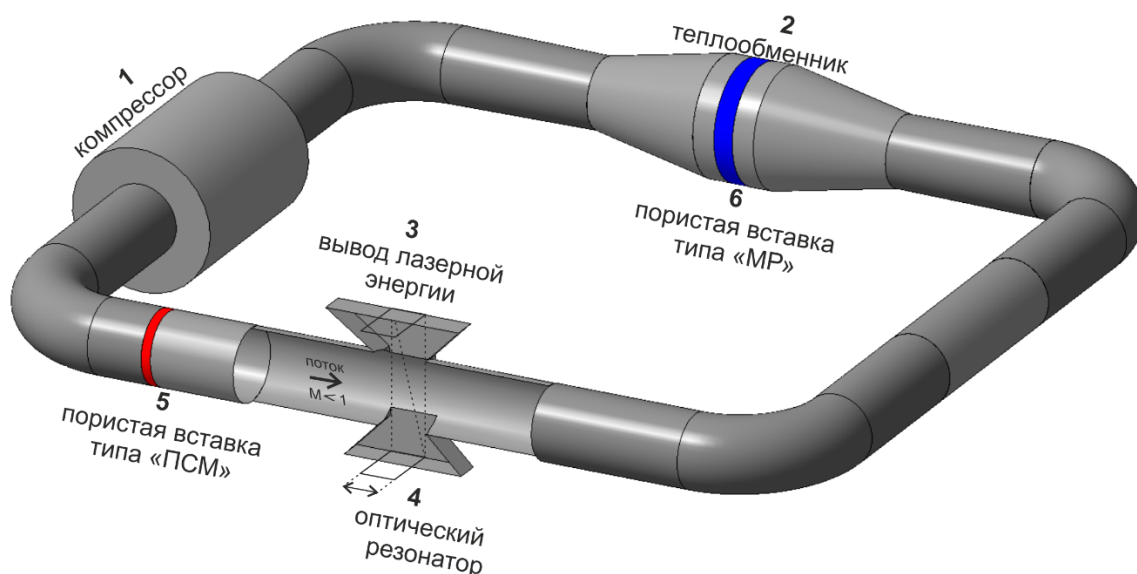


Рисунок 1.1 Схема лазера с закрытым циклом работы[1]

Ключевым узлом в газовых проточных лазерах с замкнутым циклом наряду с активной средой и системой ее возбуждения является резонатор [10]. Чтобы достигнуть

неравновесного состояния, необходимо использовать косвенные способы перевода атомов в возбужденное состояние. Как правило, такие способы связаны с подводом к лазерной среде энергии извне именуемые накачкой, а инверсно населенное лазерное вещество — активной средой. На многие характеристики генерируемого излучения значительное влияние оказывают именно свойства резонаторной системы, в которую помещена активная среда лазера. Поэтому резонаторная система диктует исходные условия для активной среды. Одним из таких условий является однородность потока, который приходит в эту область. В целях защиты окон генерации в зоне резонатора применяется двухпоточная система [31], когда активная среда экранируется инертным газом. В такой конструкции возникает новая проблема получения минимальной зоны перемешивания активной среды и инертного газа.

Наиболее сильно неоднородности плотности сказываются на характеристиках излучения лазеров, работающих при достаточно высоких давлениях газа в активной зоне. Изменение фазы излучения $\Delta\phi$ связано с изменением плотности среды $\Delta\rho$ соотношением [1]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} h A_{\text{component}} \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \quad (1.1)$$

где λ — длина волны излучения, h — ширина потока, $A_{\text{component}}$ — постоянная Глэдстона-Дейла, ρ_s — плотность среды при нормальных условиях.

В свою очередь пульсации плотности напрямую зависят от пульсаций скорости. Это связано с тем, что в проточном лазере с замкнутым циклом объем газа в процессе работы системы не меняется. Скорость прокачки газа в канале много меньше скорости звука, поэтому изменение плотности (при условии отсутствия стороннего нагрева) напрямую связано с изменением пульсации скорости, т.е.:

$$Q = \rho u s \Rightarrow (\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')s \Rightarrow \rho' \approx u' \frac{\bar{\rho}}{\bar{u}} \quad (1.2)$$

В отсутствие нагрева поток активной среды, протекающий через кювету в рабочем режиме, не вносит видимых искажений в плоский волновой фронт зондирующего лазера. Однако при нагреве лазерной кюветы до рабочих температур концентрация паров активных атомов в среде значительно возрастает, что приводит к тому, что возрастает величина неоднородностей потока активной среды. Из этого можно сделать вывод, что абберрации

вызваны совокупностью двух факторов – тепловыми неоднородностями и наличием турбулентности в потоке с активной средой [32]. Стороннего источника нагрева автором в работе не рассматривается.

Поэтому понижение уровня неоднородностей потока в активной зоне является одной из основных проблем, возникающих при создании лазерных устройств. Необходимо разработка методов, позволяющие снизить пульсации скорости и привести поток к ламинарному режиму.

В проточных лазерах активная среда циркулирует по всем узлам и конструкции контура (компрессор, повороты канала, изменение размеров сечения), получая от каждого узла свои специфические возмущения потока [1, 33]. За период циркуляции по такому контуру поток существенно искажается и для восстановления его однородности требуются достаточно большие прямолинейные расстояния, что существенно увеличивает габариты контура. Т.е. необходимо применение устройств, которые на минимальном расстоянии эффективно выравнивают поток. Таким устройством может послужить конструкция из пористых структур.

В качестве элементов спрямления профиля скорости потока на рисунке 1.1 представлены пористая вставка типа «ПСМ», а для получения эффективных поверхностей теплообмена используется пористая вставка типа «МР».

В процессе работы лазера в его активной зоне выделяется тепло. Избыточное количество тепла выделяется преимущественно в процессе работы системы накачки. Выделившееся тепло концентрируется в зоне активной среды. И если для некоторых маломощных лазерных систем требуемый температурный режим можно обеспечить за счет естественного охлаждения, то с увеличением мощности лазера возникает необходимость в специальных системах теплоотвода, которые предполагают непрерывную прокачку активной рабочей среды по замкнутому контуру, включающему теплообменник [10]. Эффективность работы теплообменников напрямую зависит от площади охлаждающих поверхностей, с которыми контактирует активная среда в процессе движения, и однородности движения потока при контакте. Для обеспечения большей площади контакта активной среды с охладителем также может использоваться пористая вставка [34].

Для ряда непрерывных лазеров большой мощности одной из ключевых проблем является прокачка активной среды и отведение от нее тепла [35-38]. Организация смены активной среды и эффективное ее охлаждение являются основными задачами лазерной

газовой динамики.

Таким образом, принципиальной задачей исследования понять какую структуру приобретает поток после прохождения поворотов в конструкции, изменения площади поперечного сечения канала, как изменится структура потока при наличии в канале пористой вставки, а также каким образом пористая вставка влияет на перемешивание потока.

Затрагивая вопросы анализа газодинамических течений в конструкции, исследование не представляется возможным без использования современных подходов численного моделирования. В диссертации описываются исследования, полученные с помощью математического моделирования с применением современных подходов описания турбулентных течений на подробных сетках. Некоторые реперные точки для расчетов были получены экспериментально при непосредственном участии автора (по заданию автора).

1.3 Подходы к моделированию течений в каналах с пористыми вставками

Получение однородного потока внутри канала является одной из важных прикладных задач во многих отраслях науки и техники. В ряде технических решений авиационной, ракетно-космической и лазерной областях, необходимо иметь однородный поток, чтобы обеспечить минимальное гидродинамическое сопротивление, а сложные конструкционные решения на установках зачастую лишь турбулизируют его. Одним из способов выравнивания профиля скорости потока успешно применяемых в конструкциях является использование дополнения конструкции связкой с переменным сечением («конфузор», «диффузор-конфузор») [39-41]. Однако использование такого решения может привести к тому, что с ростом площади поперечного сечения средняя скорость потока при увеличении угла расширения диффузора падает и, начиная с некоторого угла расширения диффузора заданной длины, дальнейшее увеличение угла значительно повышает коэффициент сопротивления, вызывает отрыв пограничного слоя от стенки диффузора и связанное с этим сильное вихреобразование создает неравномерность расхода в выходном сечении. Необходимо такое решение, которое могло бы выравнивать профиль скорости потока на максимально коротком расстоянии и минимальном воздействии на поток. Использование пористой вставки в канале, в качестве устройств для выравнивания профиля скорости, стало таким перспективным решением [9]. Интерес о возможности применения открытопористых структур в прикладном назначении датируется еще серединой прошлого столетия [42,43]. Недостатками известных устройств является то, что в режиме нагрузок

появляется неравномерность поля скоростей потока газа по сечению трубопровода. И в этом случае большой интерес представляют структуры высокой пористости за счет низкого гидравлического сопротивления.

Из-за отсутствия экспериментальных данных в этой области невозможно оценить масштабы однородности потока. Хорошей альтернативой выступает численный эксперимент. Численное исследование течения в установках на основе пористых структур проводится с помощью основных уравнений газовой динамики с соответствующими начальными и граничными условиями. Математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Поэтому вводятся различного рода допущения и эмпирические зависимости для коэффициентов переноса, входящих в уравнения и граничные условия.

Таким образом, для получения информации о гидравлическом сопротивлении, механизме и интенсивности теплопереноса при движении газа в пористых структурах для замыкания математической модели необходимы обширные экспериментальные исследования. И если характеристики структур малой ($\Pi < 0,5$) и средней пористости ($0.5 < \Pi < 0.7$) и процессы теплообмена в них достаточно изучены (например, [44]), то для структур высокой пористости уделено гораздо меньше внимания.

Следует отметить, что современный уровень компьютерных технологий позволяет проводить так называемые виртуальные лабораторные эксперименты. Вместо проведения дорогостоящих лабораторных исследований с помощью численного моделирования изучать можно особенности течения газа. Использование современных математических моделей, современных компьютерных технологий и методов анализа позволяет по-новому взглянуть на сложные процессы, протекающие в пористых средах.

Заметным ограничением при проведении численного моделирования течения через пористую среду являются ресурсные возможности, которыми располагает разработчик. Сложности описания моделей кратно соизмеримы с возможностями оперирования процессами на Супер-ЭВМ [45, 46]. В связи с этим проведение моделирования в рамках целостного описания системы, не разбивая ее на отдельные составные части, невозможно. Как правило, возникает потребность в структурировании функционального исследования и соответствующего деления объекта исследования на части. Такая позиция функционального разграничения исследования позволяет распределять и распараллеливать ра-

боту над сложной системой объектов, что способствует эффективности и производительности труда разработчиков.

Исследование сложных систем по частям реализуется в диакоптических методах исследования [47]. Диакоптика основана на использовании структурных особенностей анализируемых схем. В диакоптических методах производится разбиение расчетных моделей на части, которые исследуются самостоятельно.

Разбиение расчетных моделей на части позволяет упорядочить и минимизировать частоту обмена информации между оперативной и внешней памятью при анализе сложных систем, а также выбирать для исследования каждой части более выгодные режимы анализа. Эти обстоятельства делают диакоптические методы экономичными по затратам машинного времени и оперативной памяти.

В настоящее время предложено несколько подходов классификаций масштабов исследования структур. Часто используется выделение трех масштабов классификации функциональных моделей: микро-, макро- и метауровни [48]. Каждый из указанных масштабов имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при исследовании течения через пористую среду.

Микроуровень используется для исследования элементарных физических процессов (например, вязкость, извилистость каналов и т.д.), протекающих в непрерывном пространстве и времени. Особенностью постановки задач для данного уровня является подробное описание всевозможных процессов, которые происходят в рамках большой установки. На данном уровне исследования особую роль играют все молекулярные процессы, которые происходят внутри вещества и именно они являются критерием выбора сеточного разрешения для расчетной модели. Пористая структура на данном уровне рассматривается как конструкция каналов, по которым проходит вещество, а каркас пористого тела выступает жесткой стенкой. Следовательно, очень важно учитывать все особенности построения этих каналов, в том числе описания пограничного слоя.

Оценка газодинамических характеристик течения на данном уровне проводится прямым численным методом, который предполагает решение полных уравнений Навье-Стокса. Использование прямого численного моделирования связано с высокими требованиями к разностным схемам, при которых шаг интегрирования должен иметь порядок колмогоровского масштаба времени, а разностная сетка позволяла разрешить наименьшие вихри турбулентного потока [29, 49].

Такой масштаб сеточного разрешения позволяет проведение прямого численного моделирования без использования каких-либо дополнительных моделей турбулентности, ограничителей и схем конвективных потоков. В связи с этим, исследование происходит на фрагментарной модели, так как сетка полномасштабной модели будет соответствовать миллиардам ячеек. Размер фрагментарной модели соизмерим с размером поры, которая находится в диапазоне $10^{-5} - 10^{-3}$ м. Анализ процессов на таких масштабах требует значительных затрат машинного времени и памяти.

Для проведения численного моделирования полномасштабной модели используется макроуровень, на котором применяется укрупненная дискретизация пространства по функциональному признаку. На данном уровне акценты в исследовании смещаются в сторону общего описания характера потока газа, а показатели микромасштабных явлений «усредняются» или приводятся в виде эмпирических зависимостей. В [29] подробно рассмотрены всевозможные подходы численной реализации, которые используются в коммерческих пакетах. Универсальные коммерческие CFD-пакеты включают широкие наборы физико-математических моделей, конечно-разностных схем, методов решения систем разностных уравнений, из элементов которых конструируется решение той или иной задачи. Для данного уровня исследований очень важен выбор подхода к моделированию турбулентных параметров течения. Исследуемые модели имеют размерность сеточного разрешения порядка $10^{-3} - 10^{-1}$ м. Макромоделирование лежит в основе направления, связанного с рациональным выбором математических моделей элементов при построении математической модели системы.

На метауровне в качестве элементов принимают достаточно сложные совокупности моделей. Метауровень характеризуется большим разнообразием типов используемых математических моделей. Например, совместное решение тепловой и газодинамической задачи. В данной работе данный уровень рассматриваться не будет.

Классификация исследования моделей в различных масштабах активно применяется в геологии, нефтедобывающей промышленности.

1.4 Физические свойства пористых сред

Применение пористых материалов является актуальной темой для многих отраслей промышленности. С точки зрения тепломассопереноса, пористое тело выступает ком-

пактным и высокоэффективным устройством, которое применяется в лазерной, авиационной, автомобильной технике. Если рассматривать с позиции гидрогазодинамики, пористое тело выступает каркасом, через которое движется газ под действием перепада давления.

В модельном представлении пористую структуру можно представить как сплошную пластину с системой цилиндрических каналов в направлении движения потока одного диаметра и длиной, равной толщине пластины (см. рисунок 1.2, а) [50]. В действительности, она имеет существенные особенности. Поры, как правило, представляют собой систему разветвленных каналов с переменным сечением, как по форме, так и по размеру. В связи с этим детальное описание поведения потока в подобной системе является сложной задачей.

По структуре построения пористые проницаемые материалы, можно разделить на несколько категорий [51]: 1) порошковые пористые (ППМ) с диапазоном пористости до 50 %, 2) волокновые (ПВМ) с диапазоном пористости до 80 % (см. рисунок 1.2, б), 3) сетчатые (ПСМ) с диапазоном пористости 20 – 80 % (Рисунок 1.2, д), 4) металлорезина (МР) с диапазоном пористости 50 – 80 % (Рисунок 1.2, г), 5) ячеистые (ПЯМ) с диапазоном пористости 75 – 97 % (Рисунок 1.2, в).

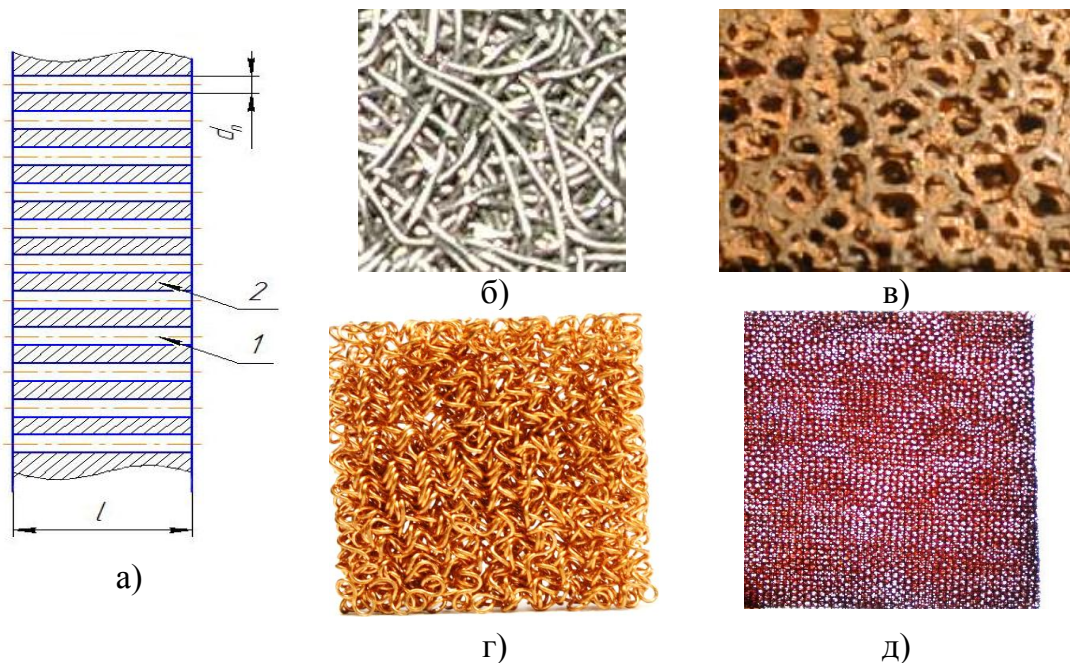


Рисунок 1.2 а) Идеальная пористая среда [50]: 1 – диаметр поры d_p и длиной l , 2 - непроницаемый материал, б) фото образца пористой структуры типа «ПВМ», в) фото образца пористой структуры типа «ПЯМ», г) фото образца пористой структуры типа «МР», д) фото образца пористой структуры типа «ПСМ»

Так как существует множество видов конструкций, на сегодняшний день отсутствует универсальная методика для описания детальных свойств пористой среды. Пористое тело отличается по материалу, структуре, по способу происхождения и т.д. Поэтому, как правило, решение задачи течения газа через пористую среду в рамках исследования макромоделей касается конкретных образцов или категорий. При описании крупномасштабных явлений пористый материал рассматривается как сплошная среда, характеристики которой в каждой точке получаются в результате осреднения в некоторой окрестности, содержащей достаточно большое количество пор [52].

Величина пористости, размер пор, распределение пор в пространстве и их форма обуславливают такие свойства, как прочность, электро- и теплопроводность, гидравлическая прочность, фильтрационные характеристики и т.д. [9].

1.4.1 Пористость

Одной из ключевых характеристик для описания пористой среды является коэффициент пористости. Коэффициент пористости – это величина, которая показывает в процентном (или долевым) соотношении объема газа в полном объеме V [34]:

$$P = \frac{V_B}{V} = 1 - \frac{V_M}{V} \quad (1.3)$$

где P – коэффициент пористости, V – полный объем, V_B – объем газа, V_M – объем материала конструкции.

Данная формула показывает полную или общую пористость структуры. Она учитывает всевозможные объемы внутри структуры независимо от изолированности и взаимосвязей. Но, с точки зрения движения газа через пористую структуру, изолированные каналы не участвуют в процессе перемещения вещества и поэтому используют такое понятие как активная или эффективная пористость, определяемую как объемная доля связанных между собой пор, которые могут быть заполнены веществом извне [52, 53].

На практике достаточно тяжело произвести оценку эффективной пористости. В работе [54] предложено рассматривать эффективную пористость как полином третьей степени:

$$P_{eff} = ax^3 - (2a + P_c)x + (a + 1 + P_c)x \quad (1.4)$$

где $x = (P - P_c)/(1 - P_c)$, $a = 0.3$, $P_c = 0.33$.

Уравнение (1.4) является общей формой описания эффективной пористости, однако для частного случая, описанного в [55], расчет эффективной пористости производится по формуле (1.5), которая дает хорошее количественное соответствие, но при пористости выше 0,8 эффективная пористость становится равной общей (см. рисунок 1.3).

$$\Pi_{eff} = 1 - \frac{\ln \Pi}{\ln \Pi_c} \quad (1.5)$$

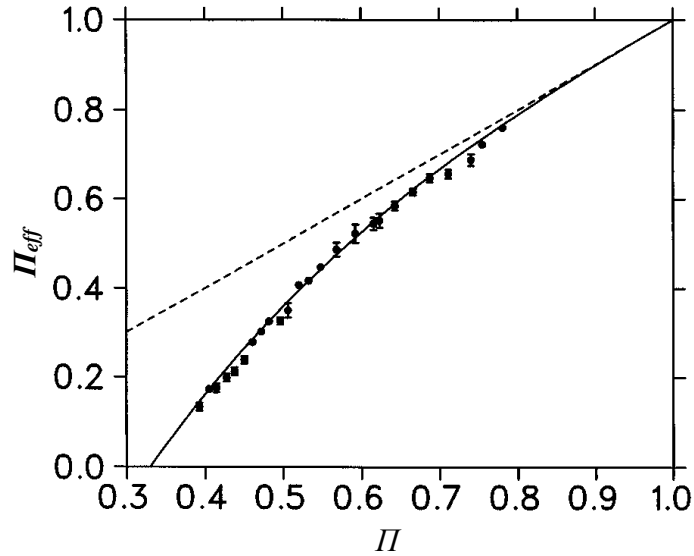


Рисунок 1.3 Зависимость эффективной пористости Π_{eff} от общей пористости Π . Сплошная линия соответствует уравнению (1.4), пунктирная линия описывает зависимость $\Pi = \Pi_{eff}$, точки – моделированные значения из [56]. Расчет ошибки включает только статистические ошибки эффективной пористости [54]

Отдельно выделяют высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), которые в зарубежной литературе называют пеноматериалами. Они обладают высокими показателями физико-химических и эксплуатационных характеристик [57, 58]. В рамках данной работы рассматриваются только открытопористые материалы.

С точки зрения выравнивания профиля скорости потока, проходящего через пористую структуру, важным критерием является однородность коэффициента пористости на всей пористой структуре. Равномерность распределения пористости по площади листовых ПСМ зависит от числа слоев исходных сеток и степени обжатия сеток при прокатке или прессовании. Рост числа слоев сеток во всех случаях повышает равномерность распределения пористости в листах ПСМ. Распределение пористости в материале можно определить методом рентгенографии или методом измерения расхода газа при его фильтрации через отдельные участки пористой поверхности, а также разрезкой материала на

отдельные элементы с последующим определением пористости для каждого из них и др.[50]

1.4.2 Проницаемость

Проницаемость пористой среды – это способность пропускать жидкость или газ под действием приложенного градиента давления. Проницаемость в случае линейной фильтрации, т.е. при малых числах Рейнольдса, определяется по закону Дарси (в случае больших чисел Рейнольдса определяется по закону Форхгеймера) согласно которому объемный расход жидкости, проходящей сквозь породу при ламинарном движении, прямо пропорционален коэффициенту проницаемости, площади поперечного сечения этой породы, перепаду давления, и обратно пропорционален вязкости жидкости и длине пройденного пути. Величина проницаемости определяется структурой пористого материала. Единица измерения проницаемости – дарси. Определяемая таким образом проницаемость представляется собой макроскопическую характеристику пористого тела.

Известно много попыток создать теорию, связывающую геометрическую структуру пористого тела с проницаемостью. Подробный анализ исследований теорий о проницаемости сделал Шейдеггер [59].

Для реальной пористой среды по закону Дарси перепад давления при ламинарном режиме течения газа в порах определяется по формуле (1.6)

$$\Delta P = \frac{\mu u_n \Delta l}{K} \quad (1.6)$$

где K – коэффициент проницаемости.

Различают абсолютную (общую), эффективную (фазовую) и относительную проницаемость. Абсолютная проницаемость характеризует физические свойства породы, т.е. природу самой среды. Эффективная проницаемость характеризует способность среды пропускать через себя жидкость или газ в зависимости от их соотношения между собой. Относительной проницаемостью называется отношение эффективной проницаемости к абсолютной проницаемости.

До сегодняшнего времени широко используется классическое уравнение Козени-Кармана для определения абсолютной проницаемости (K), связывающее параметры пористости (Π), извилистости (τ) и удельной площади поверхности (s_u) [60-62]:

$$K = \frac{1}{C_{KC} \cdot \tau^2} \cdot \frac{\Pi^3}{s_u^2} \quad (1.7)$$

где C_{KC} – постоянная Козени-Кармана (параметр, зависящий от структуры пористой среды).

1.4.3 Извилистость

Еще одним важным параметром в описании характеристик пористой структуры является извилистость. Извилистость определяется как отношение фактической длины канала по отношению к прямой длине этого канала, т.е. в случае пористых сред, толщине слоя. Впервые об этом параметре ведется упоминание в работах Козени [60], а впоследствии и Кармана [61] при определении абсолютной проницаемости.

Согласно Соузе и Набовати [63], извилистость может быть рассчитана с использованием следующего уравнение:

$$\tau = \frac{\sum_{i,j} u_{mag}(i,j)}{\sum_{i,j} |u_x(i,j)|}, \quad (1.8)$$

где $u_{mag}(i,j)$ – модуль скорости в (i,j) ячейки, $u_x(i,j)$ – маршевая компонента скорости в (i,j) ячейки.

Такой вид извилистости называется геометрическим и является объективной характеристикой структуры. В работах [64, 65] выделяют четыре вида извилистости: геометрическая, гидравлическая, электрическая, диффузионная. Каждый вид предназначен для определенной области применения. В работе автор будет опираться только на геометрический вид извилистости.

Подобное вычисление извилистости подходит для численных расчетов, когда области течения вещества хорошо описаны сеточной моделью. Большой интерес вызывает взаимосвязь между извилистостью и пористостью.

Копонен и др. [56] проводили исследование для пористой структуры типа «ПВМ» и предложили линейную зависимость между извилистостью и пористостью в виде уравнения:

$$\tau = 0.8(1 - \Pi) + 1 \quad (1.9)$$

Основываясь на результатах моделирования, Копонен и др. [54] нашли более слож-

ное выражение с включением некоторых подходящих значений. Скорректированное соотношение выражается следующим образом:

$$\tau = 1 + a \frac{(1 - \Pi)}{(\Pi - \Pi_c)^m}, \quad (1.10)$$

где $\Pi_c = 0.33$, $m = 0.65$ и $a = 0.19$.

Соуза и Набовати [63] предложили другую взаимосвязь между извилистостью и пористостью в виде функции одного полиномиального уравнения. Уравнение устанавливается следующим образом:

$$\tau = -0.5191\Pi^3 + 0.879\Pi^2 - 1.1657\Pi + 1.8058, \quad (1.11)$$

Согласно результатам Бэрранде и др. [66], связь между переменными может быть представлена с помощью логарифмической функции. Извилистость может быть выражена следующим образом:

$$\tau = 1 - 0.49 \ln \Pi, \quad (1.12)$$

Важно отметить, что в литературе извилистость определяется по-разному. Некоторые соотношения основаны на экспериментальных измерениях, а другие являются теоретическими.

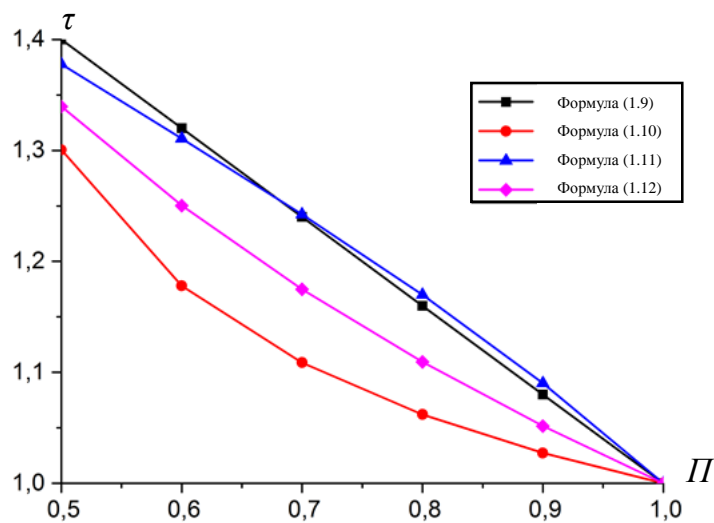


Рисунок 1.4 Четыре различных соотношения между извилистостью и пористостью

На рисунке 1.4 представлены четыре вышеупомянутых соотношения. Диапазон значений пористости составляет от 0,5 до 1. На рисунке показано, что извилистость увеличивается при уменьшении пористости.

В практическом значении, параметр извилистости напрямую влияет на характер потока, соответственно и на коэффициент диффузии потока [67-71].

Влиянию пористой среды на диффузионное перемешивание посвящены исследования [67, 68, 71-73 и др.]. Они показывают, что процесс диффузии в пористых средах протекает быстрее, чем при свободном перемешивании. Это объясняется за счет прохождения вещества по разветвленному пути и образованию на этом пути вихревых структур. В связи с этим используется понятие эффективного коэффициента диффузии, основанный на средней площади поперечного сечения, открытой для диффузии, и расстоянии, пройденного молекулами в пористых средах, которая характеризуется параметром извилистости.

Первые попытки связать параметры эффективной диффузии с параметрами пористой среды были сделаны Карманом в 1939 году. Полученные зависимости Карманом, а затем и Пенманом больше относились к идеализированным структурированно симметричным распределениям пор в пористой среде.

В работах [72,74] на основе метода компьютерной томографии приведены два практических метода измерения извилистости пористого или пористого материала. Первый метод основан на прямом измерении кратчайшего расстояния между двумя точками в порах, а второй основан на реконструкции пор или пространства проникновения.

Для анизотропных материалов коэффициент диффузии различен в разных направлениях. Для одной траектории, как и следовало ожидать, зависимость между среднеквадратичным смещением и общим пройденным расстоянием может показаться совершенно случайной. Однако среднее значение многих таких индикаторов действительно укладывается в одно значение с высокой степенью корреляции.

В дополнение к эффективной диффузии, эффективная извилистость структуры в любом из направлений также может быть определена с помощью [72, 73, 75]:

$$\frac{D_{eff}}{D} = \frac{\Pi}{\tau^2}, \quad (1.13)$$

где D – молекулярная диффузия, D_{eff} – эффективная диффузия.

Параметр извилистости используется в качестве идентификатора влияния сложных поровых структур на течение вещества [66]. Помимо движения жидкости, понятие извилистости применялась также и к другим процессам, включая молекулярную диффузию, электрическую проводимость и теплопередачу.

1.4.4 Характерный размер поры

Определение характерного размера поры напрямую зависит от структуры самого пористого материала. К примеру, в идеалистическом представлении, где пористое тело представляется в виде сплошной пластины, пронизанной упорядоченной системой цилиндрических отверстий, расположенных в направлении потока, пора представлена в виде цилиндра (см. рисунок 1.2, а).

В идеалистическом представлении диаметр поры d_n эквивалентен диаметру этого отверстия. Если поперечное сечение не круглое, то в качестве d_n в литературе [34,59] встречается (1.14):

$$d_n = \frac{4V_g}{F} = \frac{4\Pi}{F_v} \quad (1.14)$$

где F – смоченная поверхность пор, F_v – удельная смоченная поверхность.

В естественной пористой среде, поры имеют существенные различия по своим свойствам, форме, размерам и образуют хаотически сложенное соединение [76]. Для определения размеров пор существуют различные методы, как экспериментальные (вдавливание ртути, вытеснение жидкости, исследование микрофотографии), так и полуэмпирические (совместное решение уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля) [51].

Метод совместного решения уравнений Дарси и Гагена-Пуазейля широко применяется на практике. Он основан на поиске диаметра поры идеальной пористой среды, которая будет идентична по гидравлическому сопротивлению исследуемой пористой среде. Для идеальной пористой среды по закону Гагена –Пуазейля перепад давлений ΔP на линейном расстоянии Δl при ламинарном режиме течения газа в порах определяется по формуле (1.15)

$$\Delta P = \frac{32\mu u_n \Delta l}{d_n^2} \quad (1.15)$$

где u_n – скорость вещества в порах, μ – динамическая вязкость.

Размер пор в случае (1.15) определяется по формуле (1.16).

$$d_n = \sqrt{\frac{32K}{\Pi}} \quad (1.16)$$

При выводе формулы (1.16) предполагается, что длина идеальной поры равна толщине пористого образца. Для приближения расчетного и истинного значений размеров

пор целесообразно при совместном решении уравнений Дарси и Гагена-Пуазейся увеличивать длину идеальной поры, вводя коэффициент извилистости пор. Тогда диаметр поры определяется по формуле (1.17)

$$d_{n.ср.} = \sqrt{\frac{32K\tau}{\Pi}} \quad (1.17)$$

Для определения формы и состояния поверхности пор хорошо зарекомендовал себя метод микрокомпьютерной томографии. В работе [72] показано, что рентгеновская микрокомпьютерная томография и компьютерный анализ изображений являются подходящим методом визуализации и определения характеристик сложной трехмерной структуры пористых материалов с погрешностью $\sim 3\%$.

В механике пористых сред используются различные способы осреднения. В большинстве случаев характерный размер макрообъема l удовлетворяет соотношению:

$$d_n \ll l \ll L, \quad (1.18)$$

где d_n — характерный размер пор (обычно доли миллиметра), а L — характерный размер пористого каркаса.

Помимо вычисления характерного размера пор, важной особенностью является распределение этих пор в пространстве. Этот параметр называется плотность распределения объема пор по радиусу. Он представляет практический интерес, так как дает более полное представление о неоднородности реальной пористой структуры [77].

1.5 Модели пористых сред

Теория ламинарного течения через однородные пористые среды основывается на классическом эксперименте, впервые выполненном Анри Дарси в 1856 году при модернизации водопроводных сетей. Схемы эксперимента и современное изложение представлено в [75].

Закон Дарси выражается следующим образом [78]:

$$-\nabla p = \frac{\mu u_\phi}{K}, \quad (1.19)$$

где u_ϕ — скорость фильтрации, p — давление, K — проницаемость среды, μ — вязкость.

Главная особенность закона Дарси, что его применение сохраняется только в определенной области скоростей фильтрации, вне которой должны быть использованы более общие уравнения течения. В средах с высокой пористостью и проницаемостью или при

больших градиентах давления, линейный закон фильтрации не выполняется ввиду усложнения конфигурации течения на микроскопическом уровне [79, 80].

Рабочий диапазон области скоростей фильтрации задается числом Рейнольдса, определённым по линейному масштабу пор:

$$Re = \frac{u_{\phi} d_n \rho}{\mu} \quad (1.20)$$

где d_n – характерный размер пор (некоторый эффективный диаметр), ρ – плотность.

Многие исследования велись в направлении нахождения диапазона числа Рейнольдса, для которого сохраняется закон Дарси. Результатом этих исследований стали большие расхождения чисел Рейнольдса в пределах 0,01 до 10 [79]. Столь широкий разброс может быть обусловлен как особенностями методики отдельных экспериментов, так и разнообразием свойств испытанных пористых сред. Общий результат исследований состоит в том, что универсальной характеристики для определения диапазона применимости закона Дарси, к сожалению, не было получено.

Тем не менее, нарушение закона Дарси не связано с турбулизацией течения на микроуровне, хотя и сопровождается изменением структуры потока от простых струйных к более сложным. В первую очередь, нарушение закона Дарси связано со сложностью пространственной структуры каналов в пористой матрице.

За счет явлений отрыва и струйных эффектов в переходном и турбулентных режимах течения зависимость градиента давления от скорости приближается к квадратичной:

$$\frac{\Delta P(u)}{\Delta l} = \tilde{A}u + \tilde{B}u^2 \quad (1.21)$$

где u – скорость потока, $\tilde{A} = \alpha \times \mu$ и $\tilde{B} = \beta \times \rho$ – размерные вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления пористого тела, найденные с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Данное выражение называют модифицированным уравнением Дарси или уравнением Рейнольдса-Форхгеймера [81,82]. Оно приближенно отражает теоретическое определение гидравлического сопротивления любых тел.

Обычно для определения коэффициентов α и β экспериментальную зависимость потерь давления от скорости фильтрации приводят к линейному виду удобному для графического представления и применения метода наименьших квадратов:

$$\frac{\Delta p}{(\mu \Delta l u_\phi)} = \alpha + \left(\frac{\beta}{\nu} \right) u_\phi \quad (1.22)$$

В свою очередь Бринкман [83] предложил в расчете вязкостных компонент сделать упор на то, что граничное условие для тангенциальной компоненты может быть получено из некоторых дополнительных предположений о совокупности частиц.

Модель Дарси, в отличие от модели Форхгеймера-Бринкмана, даёт однородные в поперечном направлении профили скорости фильтрации, в результате чего на границах формируются скачки скорости, что некорректно отражает структуру потока в средах с высокой проницаемостью и пористостью. Модель Бринкмана лишена этого недостатка, потому что в ней введено дополнительное вязкое слагаемое, связанное с диффузией импульса. Это позволяет более корректно описывать пограничные слои вблизи твёрдых стенок и границ раздела потоков с различными свойствами. В работах [84-86] показано, что при осреднении уравнений Навье–Стокса по объёму пор в уравнении фильтрации остаётся слагаемое с $\nu \nabla^2 \vec{u}_\phi$ [87, 88].

1.5 Математическая модель для описания турбулентных и фильтрационных течений

Математическая модель, используемая для описания турбулентных течений газа в криволинейном канале, состоит из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и уравнений модели турбулентности [89, 29, 90]. Для несжимаемого газа уравнения Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier-Stocks или RANS) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{u} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \nabla) \cdot \vec{u} &= -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_t). \end{aligned} \quad (1.23)$$

здесь \vec{u} – вектор скорости осредненного течения, $\boldsymbol{\tau}_m$ и $\boldsymbol{\tau}_t$ молекулярная и турбулентная составляющие тензора касательных напряжений. Молекулярная составляющая тензора касательных напряжений определяется с помощью реологического закона Ньютона [91]:

$$\boldsymbol{\tau}_m = 2\mu \left(\boldsymbol{S} - \frac{1}{3} \boldsymbol{I} \nabla \cdot \vec{u} \right), \quad (1.24)$$

где $\boldsymbol{S} = \frac{1}{2} (\nabla \vec{u} + [\nabla \vec{u}]')$ – тензор скоростей деформаций, \boldsymbol{I} – единичный тензор, а μ – коэффициенты динамической вязкости.

При описании турбулентных течений в рамках подхода Рейнольдса, для замыкания уравнений используются ряд дифференциальных моделей турбулентности, среди которых две модели, которые нашли наибольшее применение в численном анализе, это: однопараметрическая модель SA [92] Спаларта-Аллмареса и двухпараметрическая модель SST [93] Ментера.

Вычисление тензора напряжений τ_t для генерации пульсаций зависит от базовой модели. Для моделей SA и SST, в вычислении τ_t используется обобщенная гипотеза Буссинеска [94]:

$$\tau_t = \mu_t \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \delta_{ij} \right) + \frac{2}{3} k_t \delta_{ij}, \quad (1.25)$$

где μ_t - турбулентная вязкость, k_t - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, δ_{ij} - символ Кронекера.

В настоящее время для расчета потоков с пристенной турбулентностью развиваются вихреразрешающие модели, которые позволяют увеличить разрешающую способность моделирования турбулентных течений [95, 29] и получать более адекватные результаты.

В рамках модели крупных вихрей исходные уравнения совпадают по форме с уравнениями (1.23), в которых турбулентная вязкость определяется размером фильтра или размером конечно-разностной сетки ([29]).

Так как рассматриваемые течения являются турбулентными, то в данной работе используются как RANS подход, так и вихреразрешающий, основанный на зонном RANS-LES методе счета, согласно которому модель делится на две части с заданными границами RANS и LES областями при этом на входе в LES область создается «искусственная» турбулентность (флуктуаций скорости). RANS подходы, основываются на однопараметрической модели турбулентности Спаларта-Аллмареса (SA) и двухпараметрической модели турбулентности Ментера (SST).

Турбулентная вязкость ν_t в модели SA в рамках RANS подхода связана соотношением с модифицированной кинематической турбулентной вязкостью ν [95]:

$$\nu_t = f_{\nu_t} \nu, \quad (1.26)$$

где

$$f_{\nu_t} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{\nu_t}^3}, \quad \chi = \frac{\nu}{\nu}, \quad (1.27)$$

а ν – молекулярная вязкость газа, эмпирическая константа $c_{\nu_i} = 7.1$.

Уравнение переноса записывается имеет следующий вид:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = P_{v_i} + D_{v_i} - \varepsilon_{v_i}, \quad (1.28)$$

$u_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i}$ являются конвективным членом, P_{v_i} – генерационный член, под которым понимаются все источники за исключением подавления турбулентности стенкой, определяющийся по формуле:

$$P_{v_i} = c_{b1} \Omega(\mathbf{S}) v_i, \quad (1.29)$$

где $c_{b1} = 0.1355$, $\Omega(\mathbf{S})$ – завихренность (деформация), которая является тензорно инвариантной величиной.

D_{v_i} – диффузионный член, который определяется по формуле:

$$D_{v_i} = \frac{I}{\sigma} \left(\left[\nabla \cdot (v_i \nabla v_i) \right] + c_{b2} \left[(\nabla v_i) \cdot (\nabla v_i) \right] \right), \quad (1.30)$$

где $\sigma = \frac{2}{3}$, $c_{b2} = 0.622$.

ε_{v_i} – диссипативное слагаемое ориентировано на логарифмическую область пограничного слоя, определяющийся соотношением:

$$\varepsilon_{v_i} = c_{w1} \left(\frac{v_i}{d} \right)^2, \quad (1.31)$$

где $c_{w1} = \frac{c_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + c_{b2})}{\sigma}$, $\kappa = 0.41$.

Из моделей с двумя уравнениями чаще всего применяется модель Ментера (SST). Особенность модели SST в том, что она сочетает в себе $k-\omega$ модель (используется в пристенной области) и $k-\varepsilon$ модель (используется для расчетов во внешнем потоке) [96, 97]

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} &= \nabla \cdot ((\nu + \sigma_k v_i) \nabla k) + P_k - \beta^* \omega k, \\ \frac{D\omega}{Dt} &= \nabla \cdot ((\nu + \sigma_\omega v_i) \nabla \omega) + \frac{\gamma}{v_i} P_k - \beta \omega^2 + (1 + F_1) \frac{2\sigma_\omega \omega^2}{\omega} (\nabla k) \cdot (\nabla \omega), \end{aligned} \quad (1.32)$$

где $v_i = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}$, $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$, $\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09 \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega}\right)$,

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta\}, F_1 = \tanh(\arg_1^4), \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right],$$

$$CD_{k\omega} = \max(D_{k\omega}, 10^{-20}), D_{k\omega} = \frac{2 \sigma_{\omega 2}}{\omega} (\nabla k) \cdot (\nabla \omega),$$

Константы модели [96]:

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \kappa = 0.41,$$

$$a_1 = 0.31, \gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\sigma_\omega \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}.$$

Используемые дифференциальные модели имеют недостаток. Их решение не может самостоятельно выйти из нуля. Поэтому предполагается, что в потоке существует минимальные возмущения. Поэтому, всегда должно быть задано некое начальное распределение турбулентных параметров на границе.

Поиск решения ограничивается геометрической моделью исследуемой конструкции, в которой поверхности выступают ограничителем расчетной области называемые границами. На данные границы расчетной области задаются граничные условия входа, выхода, стенки и т.д. В граничных условиях рассматриваются изменения турбулентных параметров RANS подхода. Турбулентные параметры потока определяются по заданию величин интенсивности и масштаба турбулентного потока [98, 99].

Интенсивность турбулентного потока определяется как отношение среднеквадратичного отклонения скорости к усредненному значению скорости потока. Для внутренних течений, интенсивность зависит от предыстории набегающего потока. Если известно, что набегающий поток не развитый и невозмущенный, тогда значение показателя интенсивности может быть менее 1 %, при полностью развитом потоке величина интенсивности может достигать нескольких процентов. Считается, что значения интенсивности более 10% является высокоинтенсивными.

Масштаб турбулентности – это величина, характеризующая размер «крупных» вихрей турбулентного потока. При развитых внутренних течениях в трубах, масштаб турбулентности ограничивается геометрическими размерами канала.

Современные подходы к моделированию течений в каналах подобного типа предъявляются высокие требования к описанию турбулизации потока. Использование RANS моделей в расчетах такого типа дает, как правило, квазистационарную картину течения, что не совсем соответствует действительности. Поскольку модели турбулентности

должны достаточно точно описывать не только усредненные поля, но и мелкомасштабные пульсации отрывных течений, которые можно получить только в нестационарном расчете. В настоящее время для этих целей развиты вихреразрешающие модели турбулентности, которые позволяют увеличить разрешающую способность моделирования турбулентных течений [95] и получать более адекватные картины течений. Одним из основных требований к использованию вихреразрешающих моделей является требование к расчетной сетке. В области турбулентных вихрей сетка должна иметь размер ячеек достаточный для их разрешения.

Адекватное описание турбулентных пульсаций, которые порождаются в потоке может быть достигнуто только с использованием прямого численного моделирования (DNS) или альтернативным подходом выделенной области моделирования крупных вихрей (LES) с применением искусственной турбулентности на входе в эту область [95]. Существует несколько методов генерации искусственных турбулентных полей. Наиболее распространенным считается спектральный метод, основанный на преобразованиях Фурье [100, 101].

Вихреразрешающий подход зонный RANS-LES предполагает разграничение расчетной сеточной модели на регионы, в которых будут функционировать RANS и LES методы [102, 103]. Регион LES располагается в том месте, где требуется получение более точных результатов и измерения нестационарных характеристик течения. Поэтому применение такого метода проходит поэтапно: сначала проводится стационарный RANS расчет всей расчетной области (этап 1), а затем нестационарный расчет с использованием LES модели в соответствующем регионе (этап 2). При этом на LES этапе расчета в качестве граничного условия для скорости на RANS-LES интерфейсе задается скорость в соответствующем сечении из уже известного (полученного на первом этапе) RANS решения, к которой добавляются искусственные (“турбулентные”) флуктуации.

Величины этих флуктуаций должны соответствовать распределению тензора $\tau_{t_{ij}}$ (1.24), вычисленному в стационарной постановке, и поэтому данный тензор напрямую определяет их амплитуду [102].

На этапе 1 и в области RANS и области LES решается система уравнений Навье-Стокса, осредненная по Рейнольдсу (1.23). Основной целью стационарного расчета получить распределение поля скорости u_i и тензора τ_t на интерфейсе RANS-LES, которые в

последующем нужны в нестационарном расчете для формирования турбулентных структур. Создание турбулентных структур проводится путем явного внесения в стационарное поле скорости u_i^0 пульсаций u'_i :

$$u_i = u_i^0 + u'_i . \quad (1.33)$$

Пульсации скорости u'_i вычисляются искусственным путем с использованием того или иного алгоритма генерации [102, 103]. Величины пульсаций должны соответствовать распределению тензора τ_i (1.24), вычисленному на первом этапе, и поэтому данный тензор напрямую определяет их амплитуду [102]. Неверное предсказание тензора τ_i на интерфейсе RANS-LES приводит к значительной погрешности в генерации турбулентных структур на входе в LES область.

Считается, что в моделировании, основанном на вихреразрешающем подходе существуют определенные пульсации в потоке, которые описываются по гармоникам, амплитуды которых задаются случайным образом, то есть с использованием вероятностного подхода при этом моделирование неоднородности инициализируется с помощью так называемого генератора «синтетической» турбулентности.

Законы движения жидкостей через пористые среды приведены в работах [76, 59, 104-106].

В рамках макроподхода, в области, где среда имеет пористую структуру, для описания течения веществ используются уравнения Бринкмана-Форхгеймера, которые имеют следующий вид [83]:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 , \quad (1.33)$$

уравнения сохранения импульсов

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho(\alpha_x |V| + \beta_x)u + \nu \nabla^2 u , \quad (1.34)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho(\alpha_y |V| + \beta_y)v + \nu \nabla^2 v , \quad (1.35)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho(\alpha_z |V| + \beta_z)w + \nu \nabla^2 w , \quad (1.36)$$

уравнение теплопереноса в форме Кирхгофа относительно температуры T :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = - \frac{\partial q_{T,j}}{\partial x_j}, \quad (1.37)$$

1.6 Математическое моделирование течений в пористых структурах

Исследование пористых структур всегда вызывало большой практический интерес. Классификаций и характеристик пористых структур огромное количество. К сожалению, универсальной модели для точного описания процесса течения вещества в пористой среде в настоящий момент не существует, и поэтому при решении задач фильтрации используют осредненные характеристики пористого тела. Выходными данным при решении таких задач является гидравлическое сопротивление и перепад давления.

Большинство исследований пористых структур основываются на применении фильтрационных моделей описания пористой среды. Фильтрационные параметры модели напрямую зависят от структуры пористой среды и свойств газа, поэтому для решения задачи с конкретным видом или классом пористой среды выводятся свои закономерности и исследуются характеристики. Так, например, в работе [44] получены экспериментальные данные о вязкостных и инерционных коэффициентах сопротивления различных пористых структур типа ПСМ. В исследованиях [58] предложены модели и получены зависимости, описывающие структуру и свойства для ряда высокопористых сред.

Большое внимание уделяется экспериментальным исследованиям пористых сред с целью визуализации и характеристики сложной трехмерной структуры пористых материалов. Так в работах [72,73,107] показано, что рентгеновская микрокомпьютерная томография и компьютерный анализ изображений являются подходящим, не инвазивным, прямым методом. В статье [77] систематизируются методы исследования пористых структур, сделана попытка классификации параметров пористой структуры.

В тоже время численный эксперимент становится более значимым. В работе [108] проведено моделирование прохождения потока с низким числом Рейнольдса через регулярную и стохастическую структуру с использованием решетчатый метод Больцама. Авторами проанализирована зависимость перепада давления на структуре от пористости и числа Рейнольдса. Было обнаружено, что перепад давления на стохастической структуре описывается одной и той же функцией пористости с несколько иным показателем "масштабирования", который, по-видимому, зависит от структуры. Также обнаружено, что со-

противление потоку нерегулярных структур явно меньше, чем у регулярных, из-за прохождения потока через очень небольшое количество самых крупных пор. Установлено, что функция Брундетта обеспечивает хорошее соответствие данным моделирования.

$$\begin{aligned} \Delta P &= C_B P_0 G_p(\alpha), \\ P_0 &= \frac{\rho u^2}{Re_d} = \frac{\mu u}{d}, \\ G_p(\alpha) &\equiv \frac{1-\alpha^2}{\alpha^2}, \end{aligned} \quad (1.41)$$

где $C_B = 3.5625$.

Решетчатый метод Больцмана является одним из методов для решения задач с пористыми структурами [63,70,71,109]. Решетчатый метод Больцмана позволяет получить качественные результаты с применением ПК, однако для получения количественных характеристик требуется применение феноменологического подхода, т.е. подход, основанный на общих полученных из опыта закономерностях и гипотезах. Такой подход требует значительно больше ресурсов. В работе [110] продемонстрировано практическое применение CFD кодов для подробного моделирования течения вещества через пористое тело. В работе рассматривается высокопористый ячеистый материал, подробно описаны принципы моделирования на микроуровне пористого тела. Показано соотнесение реалистичной структуры ВПЯМ к идеализированной структурой пористых материалов через диапазон пористости и диаметр поры. В работе [111] с использованием пакета ANSYS FLUENT было проведено численное моделирование течения газовой смеси через высокопористую структуру пористого ячеистого материала с учетом исследования границ изменения режима течения внутри пористой структуры. Исследования показали, что зависимость перепада давления от входного потока имеет нелинейный характер и может быть описана двучленным уравнением вида (1.20).

Современное программное обеспечение и высокопроизводительные комплексы позволяют спроектировать максимально точные конструкции пористых тел, на основании которых можно проводить инженерный анализ на мелкомасштабной сетке. На сегодняшний день известны такие высокопроизводительные комплексы, например, [112], которые за счет центров удаленного доступа может быть использован в любой точке страны. К примеру, суперкомпьютерный центр ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» города Саров разработаны и эксплуатируются современные суперкомпьютеры, которые обеспечивают реше-

ние широкого круга задач [113,114]. Для проведения оценки газодинамических характеристик пористых тел известны такие универсальные коммерческие CFD-пакеты как ANSYS FLUENT [115], STAR CCM+ [116], COMSOL [117], а также отечественный комплекс ЛОГОС [27,28]. Все расчеты, представленные в диссертации, проведены в отечественном пакете программ инженерного анализа ЛОГОС при непосредственном участии диссертанта.

1.6 Вывод по первой главе

Основные результаты данной главы кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Обозначены газодинамические проблемы, которые возникают при проектировании проточных лазеров с замкнутым циклом. Основной акцент проблематики сделан на вопросы выравнивания профиля скорости в зоне генерации излучения и эффективности работы теплообменников, которые напрямую зависят от площади охлаждающих поверхностей при контакте активной среды в процессе движения, и однородности движения потока.

2. Сформулировано направление исследования диссертационной работы, а именно применение многомасштабного численного моделирования для описания структуры потока после прохождения поворотов в конструкции, изменений площади поперечного сечения канала, а также течения через пористую вставку и ее влияния на структуру потока при ее наличии в канале.

3. Проведен обзор литературы по физико-математическим моделям описания течения газа в каналах и пористых структурах, который показал, что исследованию пористых структур посвящено большое количество публикаций, хотя высокопористые структуры остаются малоизученной областью.

4. Дан обзор используемых методов моделирования течения в пористых средах. Рассмотрены подходы моделирования течения, в которых система уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу замыкается широко используемыми моделями турбулентности такими как SST и SA. Также рассмотрен вихреразрешающий подход типа зонного RANS-LES. Для описания течения газа через пористую вставку на макроуровне применяется модель Форхгеймера-Бринкмана.

5. С целью выявления зависимостей описания пористой структуры в макромасштабе выполнен обзор физических свойств пористых сред по показателям коэффициента пористости, характерного размера поры, извилистости и проницаемости.

Глава 2 Исследование течения в канале с коленом

2.1 Введение

В данной главе автор приводит результаты численного исследования структуры турбулентных потоков в часто используемом конструкционном элементе, которым является колено. Для него построены сеточные модели, отвечающие подходам моделирования турбулентности: подходы, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS), замкнутых с помощью полуэмпирической модели турбулентности, а также вихреразрешающий, в частности, метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). Расчеты течений были выполнены как в стационарной, так и нестационарной постановках по комплексу «ЛОГОС» [28] на суперкомпьютере. Верификация численной методики проводилась экспериментальными данными, постановки которых инициировались при активном участии автора. Верификационные эксперименты проводились на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [30]. Количественным критерием влияния конструкционных изменений на однородность потока является уровень завихренности.

2.2 Постановка задачи

Рассматривается задача о структуре турбулентного течения воздушного потока за коленом и определении расстояния, на котором затухают возмущения, вызванные поворотом потока. Исследуемая конструкция состоит из прямолинейного участка трубы длиной 20 диаметров трубы, поворота на угол 90 градусов (так называемое «колени») и последующего прямолинейного участка трубы. На входе поток подается от компрессора. Длинный прямолинейный участок канала на входе призван для уменьшения пульсаций скорости и формирования равномерного потока перед поворотным участком. Фрагмент конструкции представлен на рисунке 2.1. Условия исследуемой среды – воздух при нормальных условиях. Скорость потока, определенная по расходу, составляет $u_{in} = 22.1$ м/с, что соответствует устойчивому турбулентному режиму течения. Этой скорости соответствует число $Re \approx 10^5$, определенное по диаметру трубы. Модель исследования отвечает конструкции экспериментальной установки аэродинамического стенда ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [30], на котором проводились экспериментальные исследования

структуры потока. На рисунке 2.1 красной линией показано место анализа данных параметров потока по сечению канала (А-А).

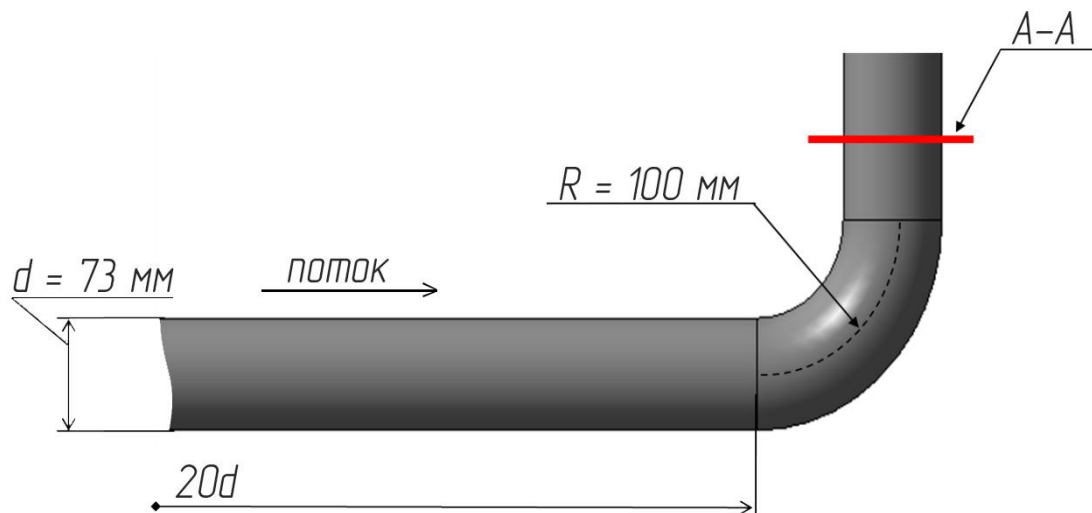


Рисунок 2.1 Схема исследуемой конструкции

2.3 Сеточные модели, подходы и методы решения, используемые для моделирования

Численное исследование структуры турбулентных потоков в криволинейном канале проводилось по комплексу ЛОГОС [27,28], включающем в себя модуль расчета течений несжимаемого газа. В этом модуле уравнения Навье-Стокса совместно с уравнениями моделей турбулентности интегрировались на неструктурированных сетках, с использованием расщепления по физическим процессам. Разностные уравнения построены на основе метода конечного объема, неявных разностных аппроксимаций и методов SIMPLE [118] и PISO [119], для определения в стационарных и нестационарных задачах согласованного распределения компонент вектора скорости и давления из условия сохранения массы газа.

Так как рассматриваемое течение является турбулентным, в решении данной задачи используется RANS подход и вихреразрешающий, основанный на зонном RANS-LES методе счёта. В этом подходе расчетная область делится на две части с заданными границами между RANS и LES областями. При этом на входе в LES область создается «искусственная» турбулентность (флуктуаций скорости). В RANS подходах для замыкания системы используются однопараметрическая модель турбулентности Спаларта-Алла

мареса (SA) и двухпараметрическая модель турбулентности Ментера (SST). В вихререзрешающие модели турбулентности области RANS также используется модель SST. В качестве начальных данных при расчете турбулентных течений задавались интенсивность турбулентности и линейный масштаб. В расчетных исследованиях проводилась вариация интенсивности турбулентного потока в диапазоне от 1% до 20% и вариация длины в диапазоне от 0.0001 до 0.05 м.

Для расчета в RANS-постановке с использованием сеточного генератора [120, 121] комплекса ЛОГОС были построены три сеточные модели с числом точек: 0.5×10^6 , 2×10^6 и 8×10^6 , в которых сетка измельчалась только в сечении. В области центральной части потока строилась структурированная декартова сетка. Для сеточной модели в 8×10^6 ячеек описание пристеночного течения около стенки формировалось из 15 слоев призматических ячеек с изменением размера по геометрической прогрессии. Первый начальный шаг Δy_1 полагался равным 2×10^{-6} м. В области колена использовалось сгущение сетки по маршевой переменной.

Параметры для остальных сеток приведены в таблице 2.1:

Количество ячеек	Базовый размер ячейки	Количество призматических слое в пограничном слое	Размер первой начальной ячейки в пограничном слое
0.5×10^6	2.16×10^{-3} м	6	2×10^{-4} м
2×10^6	1.3×10^{-3} м	10	2×10^{-5} м
8×10^6	8.7×10^{-4} м	15	2×10^{-6} м

Для расчета турбулентного течения, в рамках вихререзрешающего подхода, была адаптирована сеточная модель по схеме, приведенной на рисунке 2.2. В области LES была построена в 4 раза более подробная сетка. На входе в LES область турбулентные параметры потока задавались с помощью генерации искусственных турбулентных полей по методам из работ [122, 100].

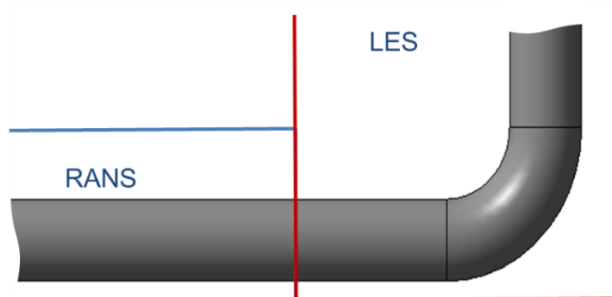


Рисунок 2.2 Схема построения сеточной модели для нестационарного счета с использованием вихререзрешающего подхода

2.4 Результаты численного моделирования на основе RANS подхода

В реальной конструкции поток на вход в канал формируется с помощью компрессора и имеет неоднородности в компонентах скорости и, соответственно, в турбулентных параметрах. Для оценки влияния неоднородностей были проведены расчеты в RANS постановке для различного уровня задания начальных возмущений. В этих расчетах компоненты вектора скорости на входе в цилиндрической системе координат определялись зависимостями:

$$\begin{aligned} u &= u_{in} + \Delta u \cos\left(\pi \frac{r}{d} n\right), \\ v &= \Delta u \sin\left(\pi \frac{r}{d} n\right). \end{aligned} \quad (2.1)$$

где n – полагалась равной 10, а Δu – определялось через заданную величину интенсивности $(T_t)_{in}$ по формуле:

$$\Delta u = \sqrt{3/2} (T_t)_{in} u_{in} \quad (2.2)$$

Значение u_0 – задавалось из условия, что средняя скорость на входе в канал равна заданной скорости потока u_{in} .

Расчеты с вариацией начальных возмущений были проведены на разных сетках. Проведенный анализ результатов, полученных на разных сетках по распределению скорости на выходе из колена, показал сходимость численного решения. На грубой сетке был проведен расчет в URANS постановке, в которой стационарное решение было получено методом установления. Это решение качественно и количественно совпало с решением, полученным в RANS постановке на той же сетке. Сравнительный анализ проводился по распределению маршевой компоненты скорости.

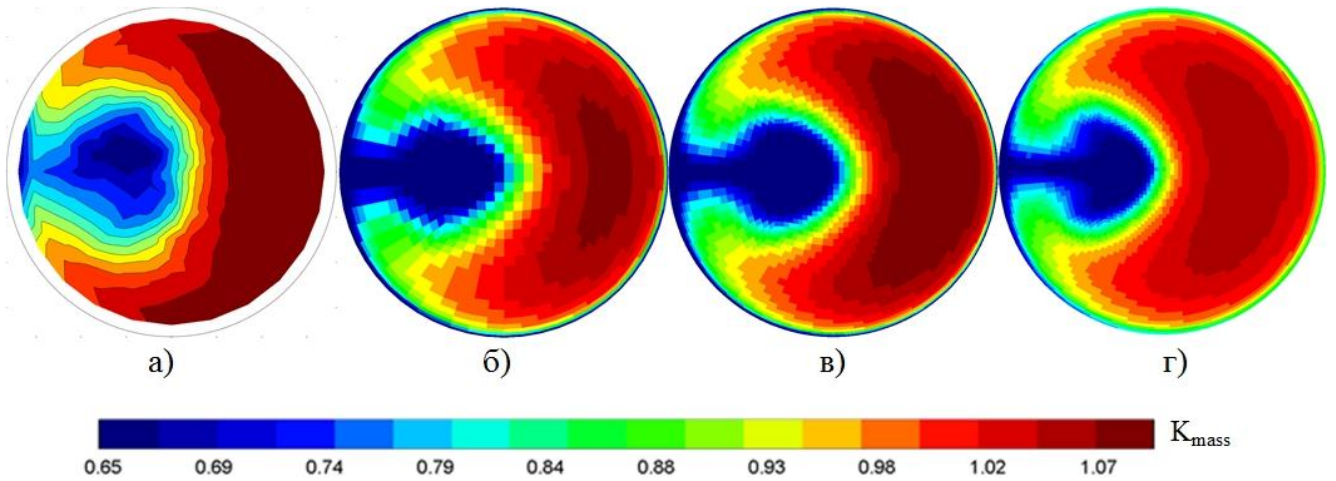


Рисунок 2.3 Сравнительный анализ численных расчетов на разных сетках с экспериментальными данными при одинаковых начальных условиях с моделью турбулентности SST при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм а) эксперимент, б) сетка 0.5×10^6 ячеек, базовый размер ячейки $\Delta x = 2.16 \times 10^{-3}$ м, в) сетка 2×10^6 ячеек, базовый размер ячейки $\Delta x = 1.3 \times 10^{-3}$ м, г) сетка 8×10^6 ячеек, базовый размер ячейки $\Delta x = 8.7 \times 10^{-4}$ м.

Количественным критерием оценки достаточности сеточного разрешения выступило среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения, которое рассчитывалось по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (u_i S_i)^2 - \sum_j (u_j S_j)^2}{\sum_j (u_j S_j)^2}}, \quad (2.3)$$

где индекс « j » - экспериментальные данные, индекс « i » - расчетные данные. Результаты оценки среднего отклонения относительно масштаба ячейки представлена на графике 2.4.

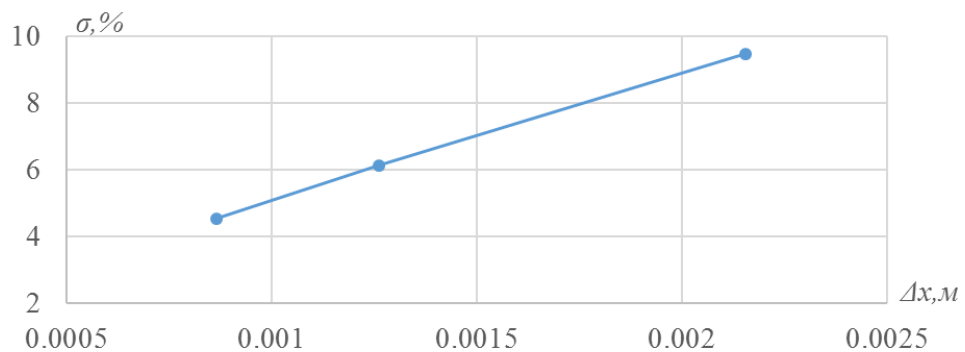


Рисунок 2.4 График зависимости среднего отклонения расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения от изменения базового размера ячейки.

Из графика видно, что решение монотонно сходится при увеличении детализации сетки. В дополнение подтверждения достаточности сеточного разрешения был построен график распределения отношения модуля скорости к массовой скорости (K_{mass}) по оси симметрии, которая рассчитывается по формуле (рисунок 2.5):

$$K_{mass} = \frac{|u|}{u_{in}}, \quad (2.4)$$

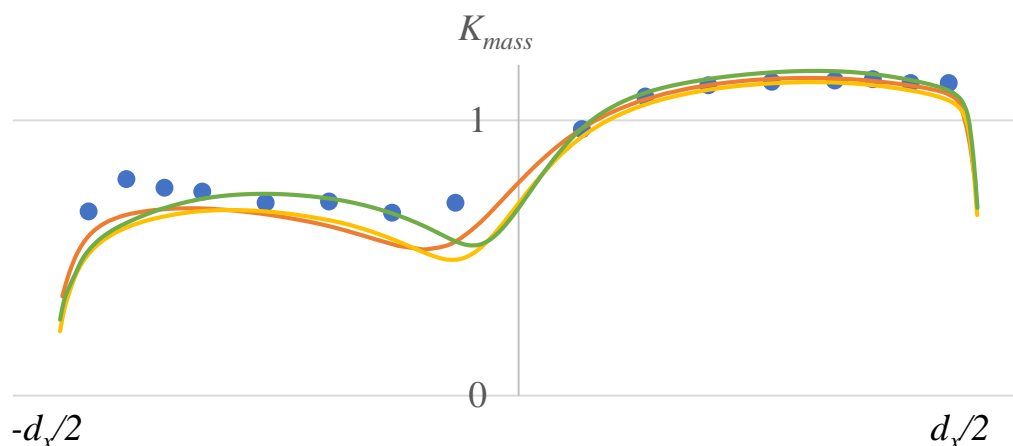


Рисунок 2.5 График распределения K_{mass} по оси симметрии. Точками указаны экспериментальные данные, красной линией отображен расчет на сетке 0.5×10^6 ячеек, желтой линией - расчет на сетке 2×10^6 ячеек, зеленой линией - расчет на сетке 8×10^6 ячеек.

Из графика видно, что для данного вида течения в RANS постановке результаты по всем трем сеточным моделям достаточно близки. Основные различия в распределении скорости по оси находятся в описании области вторичного течения. Наиболее близкими к экспериментальным значениям оказался график, построенный по расчету на сетке 8×10^6 ячеек.

Также по оси симметрии был построен график распределения турбулентной вязкости μ_t , представленные на рисунке 2.6. По данному графику видно, что решение на грубой сетке демонстрирует заниженное значение турбулентной вязкости. Решения на сетках в 2×10^6 и 8×10^6 ячеек отличаются незначительно, при этом на сетках есть небольшие расхождения в центре трубы.

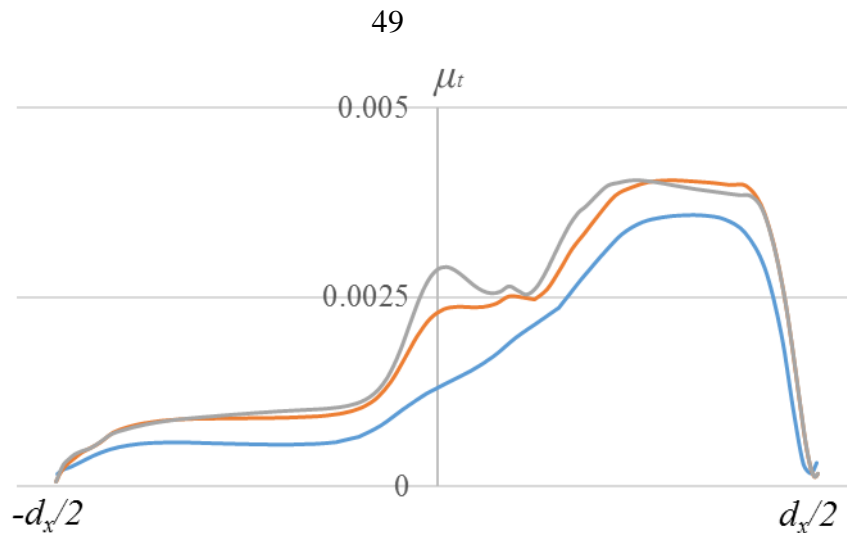


Рисунок 2.6 График распределения турбулентной вязкости по оси симметрии. Серой линией отображен расчет на сетке 0.5×10^6 ячеек, красной линией - расчет на сетке 2×10^6 ячеек, синей линией - расчет на сетке 8×10^6 ячеек.

Зависимость результатов распределения маршевой компоненты скорости в сечении А-А от начального уровня турбулизации потока показана на рисунках 2.7-2.8.

На рисунке 2.7 представлены результаты численных экспериментов модели турбулентности SST. В данной постановке модель турбулентности SST показывает хорошую сходимость и устойчивый режим счета. В процессе сходимости решения наблюдалась менее выраженная картина нестационарности течения. В связи с чем было принято решение провести дополнительно расчет нестационарного режима с выбором наиболее подходящих граничных условий. Анализ результатов показал, что изменение параметров турбулентности должны изменяться пропорционально, т.е. чем больше интенсивность турбулентности, тем больше длина перемешивания.

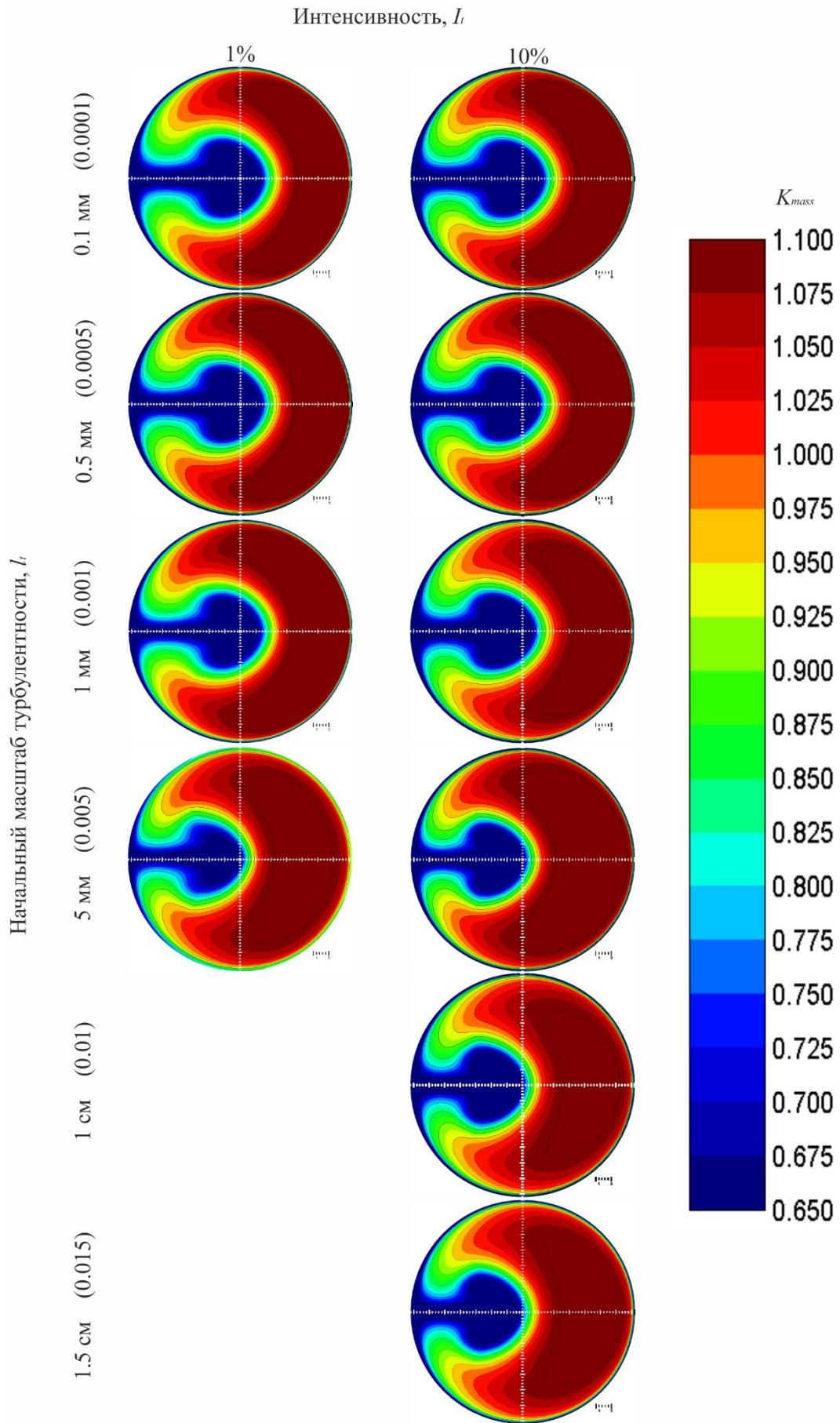


Рисунок 2.7 Результаты численных экспериментов модели турбулентности SST. Распределение K_{mass} в сечении А-А

Результаты расчета по однопараметрической модели турбулентности SA представлены на рисунке 2.8. Из рисунков видно, что модель турбулентности показывает хорошую сходимость расчета. При достижении критического значения в граничных условиях параметров турбулентности изменения профиля скорости не происходит. Данное утверждение подтверждают графики оценки изменений геометрических параметров потока относительно изменения длины перемешивания, которые изображены на рисунке 2.5.

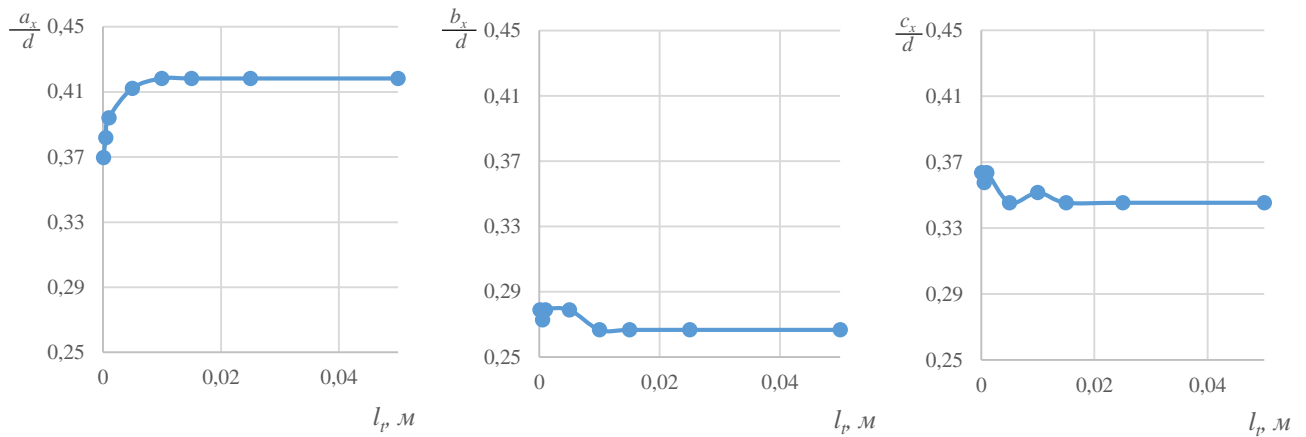


Рисунок 2.9 Оценка изменений геометрических параметров потока (a_x – толщина набегающего потока, b_x – толщина застойной зоны, c_x – высота застойной зоны) относительно изменения длины перемешивания l_t с использованием однопараметрической модели турбулентности SA при интенсивности $I_t = 10\%$

Сопоставление результатов расчетов с данными эксперимента, на основе которых была выбрана постановка граничных условий на входе для последующего анализа, приводится на рисунке 2.10. На рисунке 2.10 показаны расчетные и экспериментальные распределения маршевой компоненты скорости в рассматриваемом сечении А-А. На этом же рисунке приведены значения уровней начальных возмущений, при которых получено наилучшее согласие расчета с экспериментом по распределению маршевой скорости и формы области вторичного течения. Отметим, что экспериментальная картограмма была получена по 200 точкам, в которых производился сбор данных, а картограмма численного эксперимента построены по 3600 точкам, которые приходились на одно сечение в сеточной модели. Здесь и далее в качестве относительной скорости использована величина, равная отношению расходной составляющей скорости к средне расходной скорости u_{in} . Среднее квадратичное отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения поточечно составило менее 14 %, которое рассчитывалось по формуле (2.3).

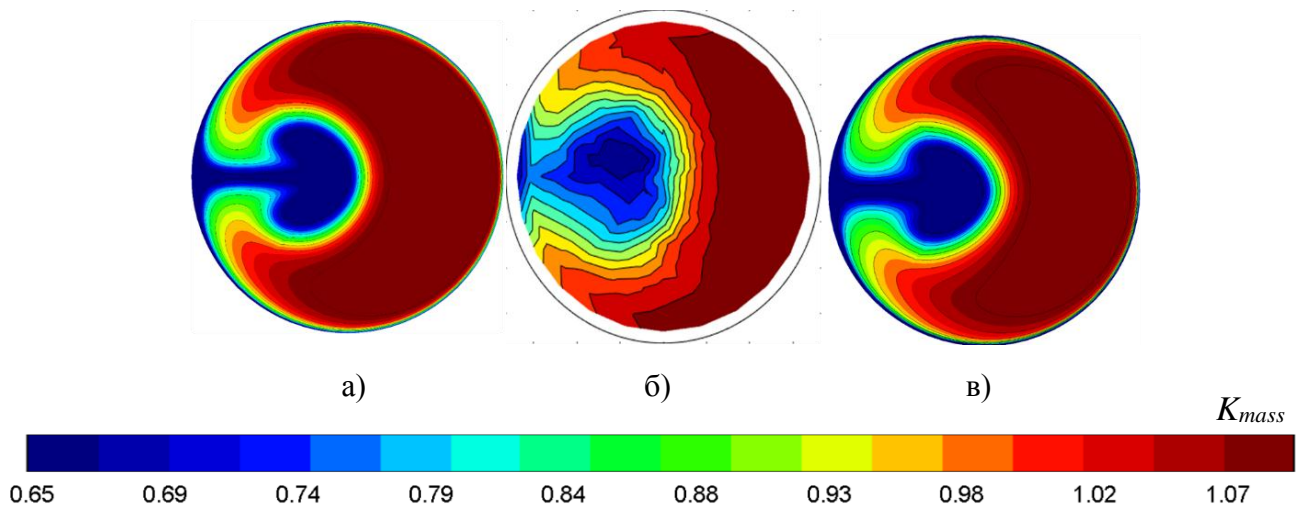


Рисунок 2.10 Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными а) с моделью турбулентности SA при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм, б) эксперимент, в) с моделью турбулентности SST при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм.

На основании проведенного анализа можно заключить, что в RANS постановке результаты качественно показывают схожую картину. Наиболее близкий результат к экспериментальному является расчет с моделью турбулентности SST при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм.

2.5 Результаты численного моделирования на основе вихреразрешающего подхода

Рассмотрим результаты, полученные при использовании, вихреразрешающего зонного RANS-LES подхода. Нестационарное моделирование турбулентного течения за коленом, было выполнено в два этапа. На первом этапе на сетке, построенной для RANS-LES подхода, был проведен расчет стационарного течения в RANS постановке. На основании полученных результатов был продолжен расчет течения в нестационарной постановке, в котором на входе в зону RANS-LES (см. рисунок 2.2) задавалась генерация синтетической турбулентности. Поскольку сбор данных для последующей обработки в экспериментах производился в каждой точке в течение 2 секунд, то нестационарный расчет также был выполнен до того же времени.

Теоретические особенности энергетического спектра рассмотрены в работах [123, 29]. Зависимость кинетической энергии турбулентности от волнового числа показана на

рисунке 2.11.

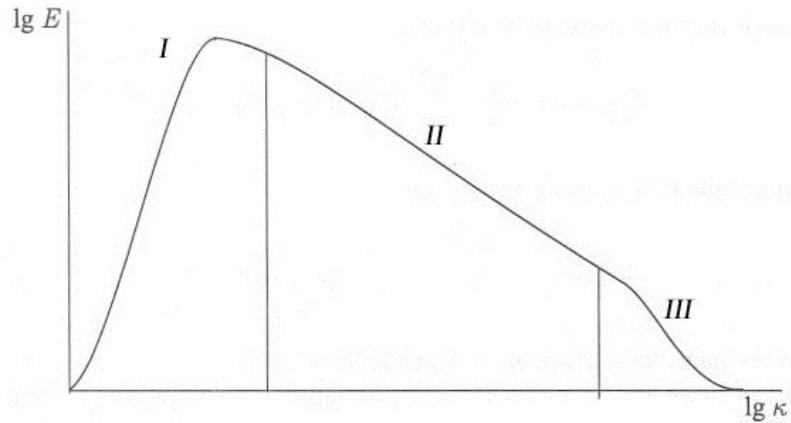


Рисунок 2.11 Спектр значений энергии турбулентности [29]. I – диапазон больших вихрей, содержащих энергию среднего потока, II – инерционный под-диапазон, III – диапазон малых вихрей (изотропная турбулентность)

При проведении оценки энергетического спектра в канале с коленом существует ряд особенностей, которые следует учитывать. Поток в изгибе становится анизотропен и неоднороден, появляются крупномасштабные структуры и нестационарные отрывные зоны. Спектр радикально меняется в зависимости от анализа зоны геометрической модели. Оптимальным решением в оценке спектра провести по трем зонам. Первая – до поворота, вторая – внутри изгиба, третья за поворотом.

Для оценки пространственного спектра была выделена вся область сеточной модели за поворотом, отвечающая за режим LES. Для получения спектра использовался метод прямого преобразования Фурье [123]. Энергетический спектр рассчитывался следующим образом:

$$\hat{f}(\kappa, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r, t) \exp(-i\kappa r) dr, \quad (2.5)$$

κ – волновой вектор, r – радиус-вектор.

$$F(\kappa) = \langle |\hat{f}(\kappa)|^2 \rangle, \quad (2.6)$$

$$E(\kappa) = \int_{|\kappa|} F(\kappa) d\kappa, \quad (2.7)$$

Энергетический спектр в расчете по LES представлен на рисунке 2.12.

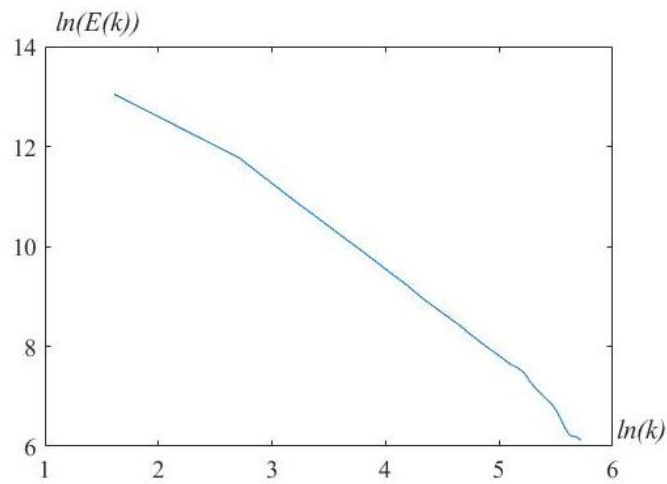


Рисунок 2.12 Пространственный спектр кинетической энергии турбулентности в момент времени $t = 2\text{с}$.

Оценка достаточности сеточного разрешения для применения вихреразрешающего подхода проводилась на анализе энергетического плотности кинетической энергии турбулентности. Подробная методика анализа описана в [29,123].

$$M = \frac{k_{res}}{k_{res} + k_{sgs}} \times 100\%, \quad (2.8)$$

где

k_{res} - кинетическая энергия является суммой кинетических энергий флуктуационной составляющей скорости по всем трем направлениям пространства:

$$k_{res} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \quad (2.9)$$

k_{sgs} – подсеточная энергия, которая оценивается через турбулентную вязкость μ_t и размер ячейки Δ :

$$k_{sgs} \approx \frac{\mu_t^2}{(C\Delta)^2}, \quad (2.10)$$

Для данной расчетной сетки такая оценка показала, что процент разрешенной энергии составляет более 85 процентов.

На рисунке 2.13 приводятся поля распределения маршевой компоненты вектора скорости в экспериментальном сечении на разные моменты времени. Видно, что решение существенно нестационарное и носит хаотический нерегулярный характер. С течением времени существенно изменяются области вторичного и основного течения, а также распределение маршевой компоненты вектора скорости. По полученным результатам было

проведено поточечное осреднение компонент вектора скорости по времени в течении второй секунды.

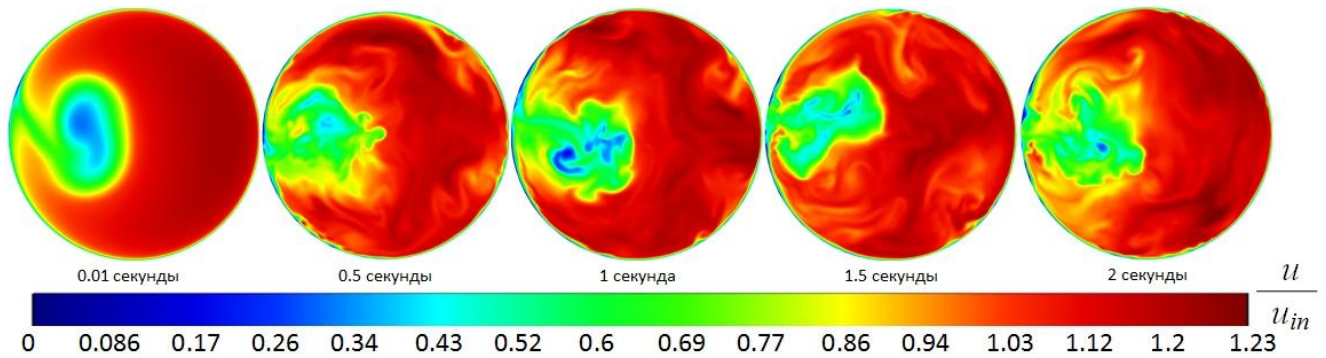


Рисунок 2.13 Распределение маршевой компоненты скорости в сечении А-А в разные моменты времени

На рисунке 2.14 показаны поля осредненных значений маршевой компоненты вектора скорости на ряд последовательных моментов времени. Если сравнить распределение осредненных полей с результатами, полученными в RANS постановке (см. рисунок 2.7), то эти распределения принимают схожий вид, немного различаясь формой областей вторичного и основного течений. Также в ходе расчета было установлено, что картина осреднения не меняется после достижения физического времени 0.5 секунды.

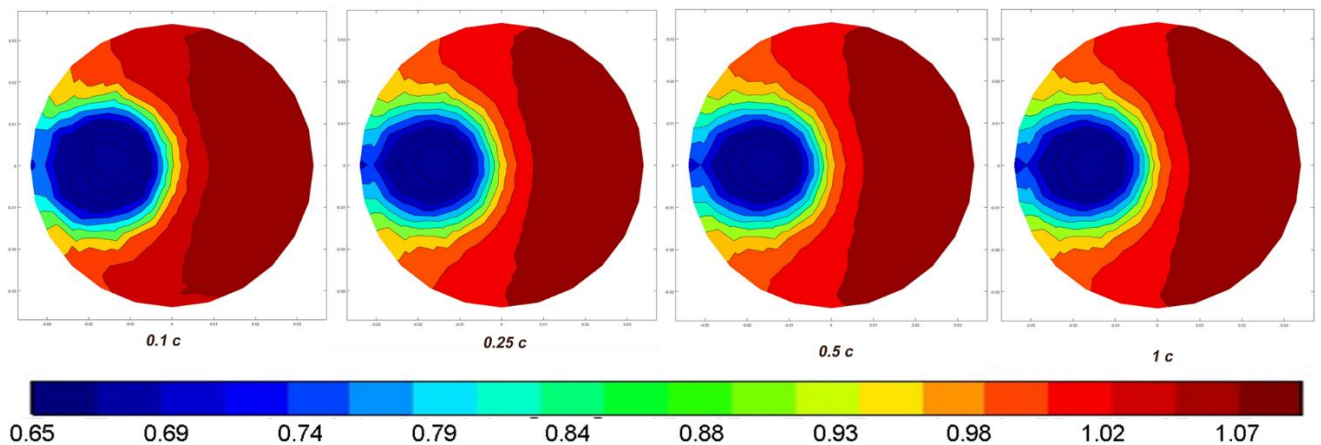


Рисунок 2.14 Сравнительный анализ осреднения данных в процессе счета

На рисунке 2.15 приводится сравнительный анализ экспериментального и осредненного распределения маршевой компоненты вектора скорости в сечении А-А. В этом расчете среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 5 %, что говорит о лучшем согласии результатов расчета с данными эксперимента.

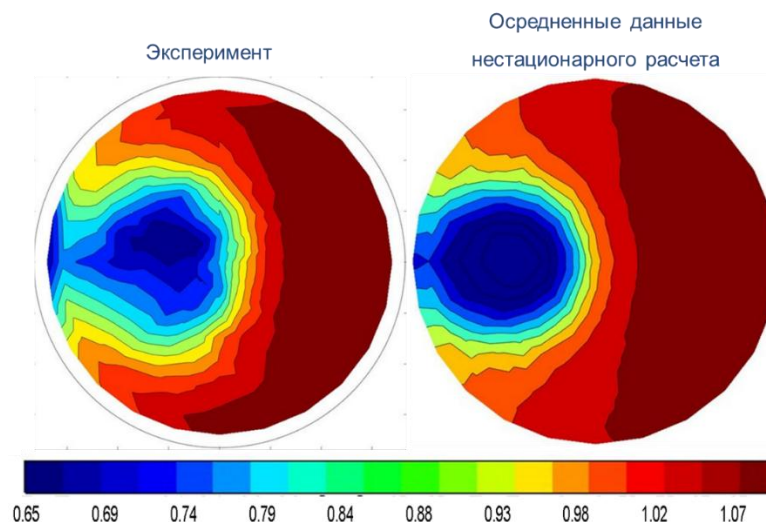


Рисунок 2.15 Сравнительный анализ распределения маршевой компоненты скорости в сечении А-А численных расчетов с экспериментальными данными

2.6 Оценка влияния колена на однородность течения

В разделе 2.3 было показано, что выбранные подходы численного моделирования максимально реалистично описывают поведение газового потока в колене. На основании выбранных подходов численного моделирования, проводится детальная оценка структуры потока.

В следствии искривления потока по форме канала в нем появляются центробежные силы, повышающее статическое давление потока от центра кривизны, что приводит к перепаду давления по сечению трубы и, соответственно, изменению профиля скорости. При переходе течения из прямолинейного участка в изогнутый, поток проходит по наименьшей траектории, устремляясь к внутренней стенке и образуя так называемый конфузортный эффект. В области внешней стенки наблюдается понижение скорости, приводящая к появлению вихревой зоны, которая вниз по потоку увеличивается (диффузорный эффект) [42]. На рисунке 2.16 показано схематическое расположение вышеуказанных вихревых зон. Относительно выхода течения из изогнутой части колена в прямолинейный участок сопровождается противоположным эффектом: поток устремляется к внешней стенке, образуя в области внутренней стенке вихревую зону [124, 125]. Подобная структура потока приводит к образованию вторичного течения, т.е. образование парного вихря, который налагается на основной поток, параллельный оси канала, и придает линиям потока винтообразный характер. В совокупности все эти явления оказывают существенное влияние на характер распределения профиля скорости за поворотом [42].

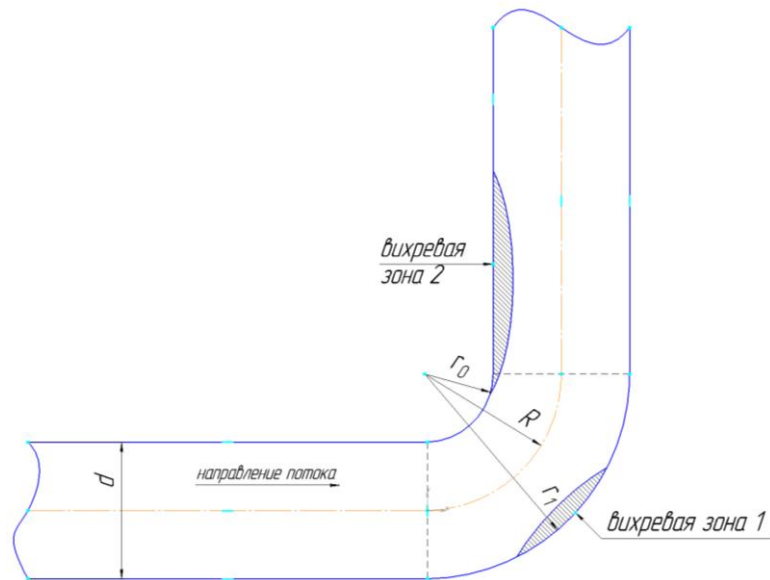


Рисунок 2.16 Схема формирования вихревых зон в криволинейном канале:

d – диаметр канала, r_0 – радиус закругления внутренней стенки, R – радиус закругления осевой линии, r_1 – радиус закругления внешней стенки

Стоит отметить, что на характер течения в криволинейном канале определенное влияние оказывают режим течения (число Re) и относительная шероховатость стенок. С увеличением числа Re происходит сдвиг области отрыва течения на внутренней кромке вниз по потоку, что приводит к уменьшению ширины зоны отрыва и неравномерности распределения скорости. Аналогичным образом на характер течения влияет и шероховатость стенок [124].

В целях исследования влияния вихревых зон на формирование течения вниз по потоку, а также исследования структуры винтового течения в канале за коленом, описанных в [41, 42], проведено численное моделирование модифицированной конструкции, описанной в п. 2.1. Модификация заключалась в надстройке канала прямолинейной трубой длиной равной 100 диаметрам трубы за коленом (рисунок 2.17). Напомним, что расчетная конструкция повторяет экспериментальную установку, в которой используется поворот, выполненный из стали 321L аналог 12X18H10T с шероховатостью $\sqrt{R_z} = 0.25$. Данный коэффициент является минимальным, соответственно, в расчетах им пренебрегаем.

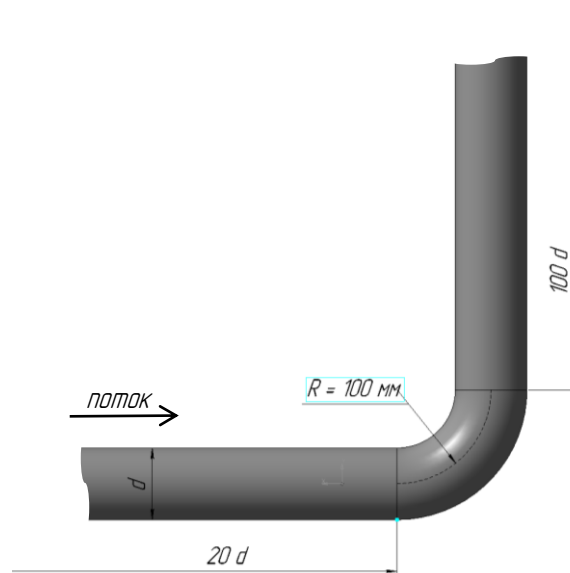


Рисунок 2.17 Схема конструкции для исследования структуры потока за коленом

Исходные данные по начальной инициализации расчетов соответствовали ранее описанным в п. 2.1: воздушный поток при нормальных условиях с числом $Re \sim 10^5$.

В качестве оценочных параметров рассматривалось поле модуля скорости в продольном и поперечных сечениях, профили расходной составляющей скорости в поперечных сечениях, точечное исследование траектории частиц, выходящих из-за поворота. Так как анализируемое течение является сугубо турбулентным, в исследовании рассматривается осредненный показатель модуля завихренности. Дополнительно во внимание приняты показатели отклонения потока от центральной оси и интенсивность вторичных течений, предложенные в [126].

На основании ранее полученных результатов, для дальнейшего анализа были выбраны постановка задачи на основании RANS подхода с начальными параметрами, которая максимально близко соответствует экспериментальным данным, а именно турбулентное течение с интенсивностью 10% и длиной перемешивания 1 мм. При решении также рассмотрены однопараметрическая (SA) и двухпараметрическая (SST) модели турбулентности.

С физической точки зрения большой интерес представляет собой поле скоростей в плоскости симметрии канала в зоне поворота. Расчетная структура потока в области колена иллюстрируется на рисунках 2.18 и 2.19. На рисунке 2.18 приводятся распределение относительной скорости и поле вектора скорости в продольном сечении. На рисунке 2.19 показаны поля относительной скорости в поперечных сечениях канала на изгибном участке.

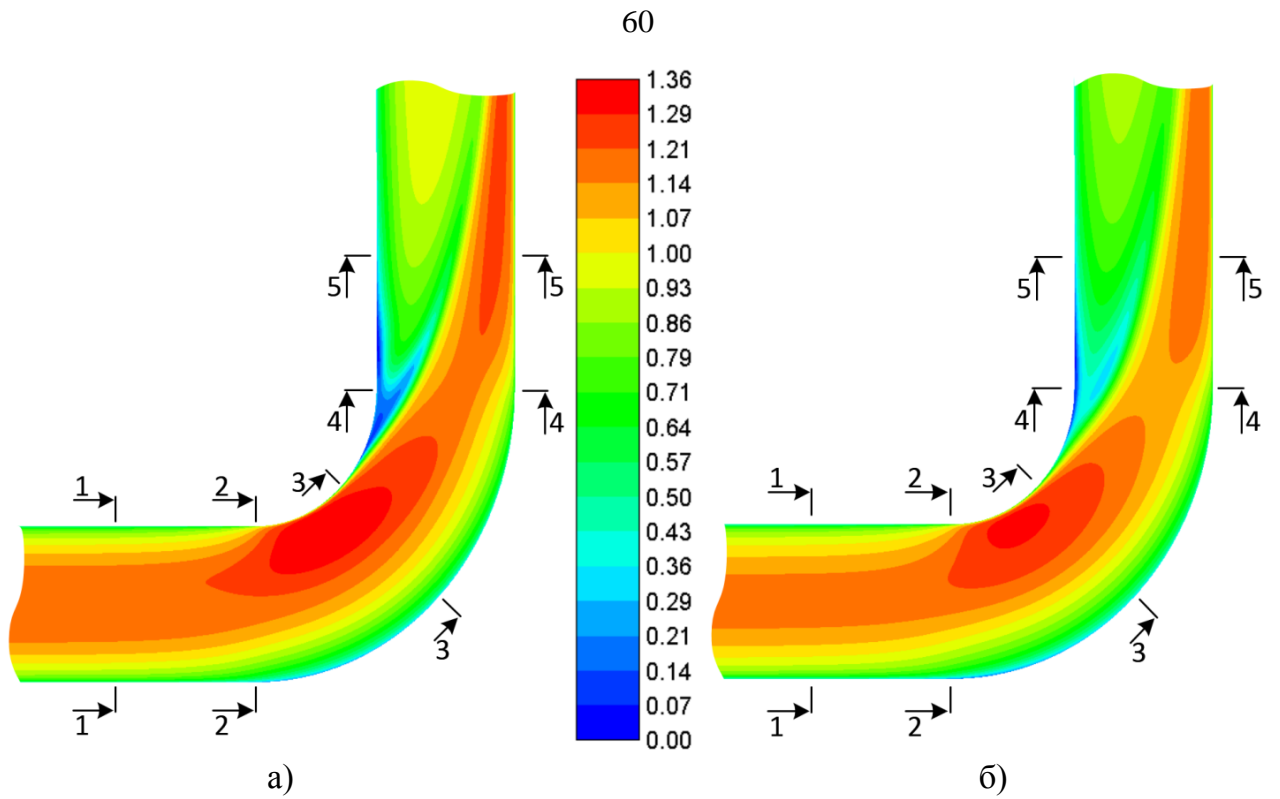


Рисунок 2.18 Распределение относительной скорости в продольном сечении в области колена с использованием модели турбулентности а) SA б) SST

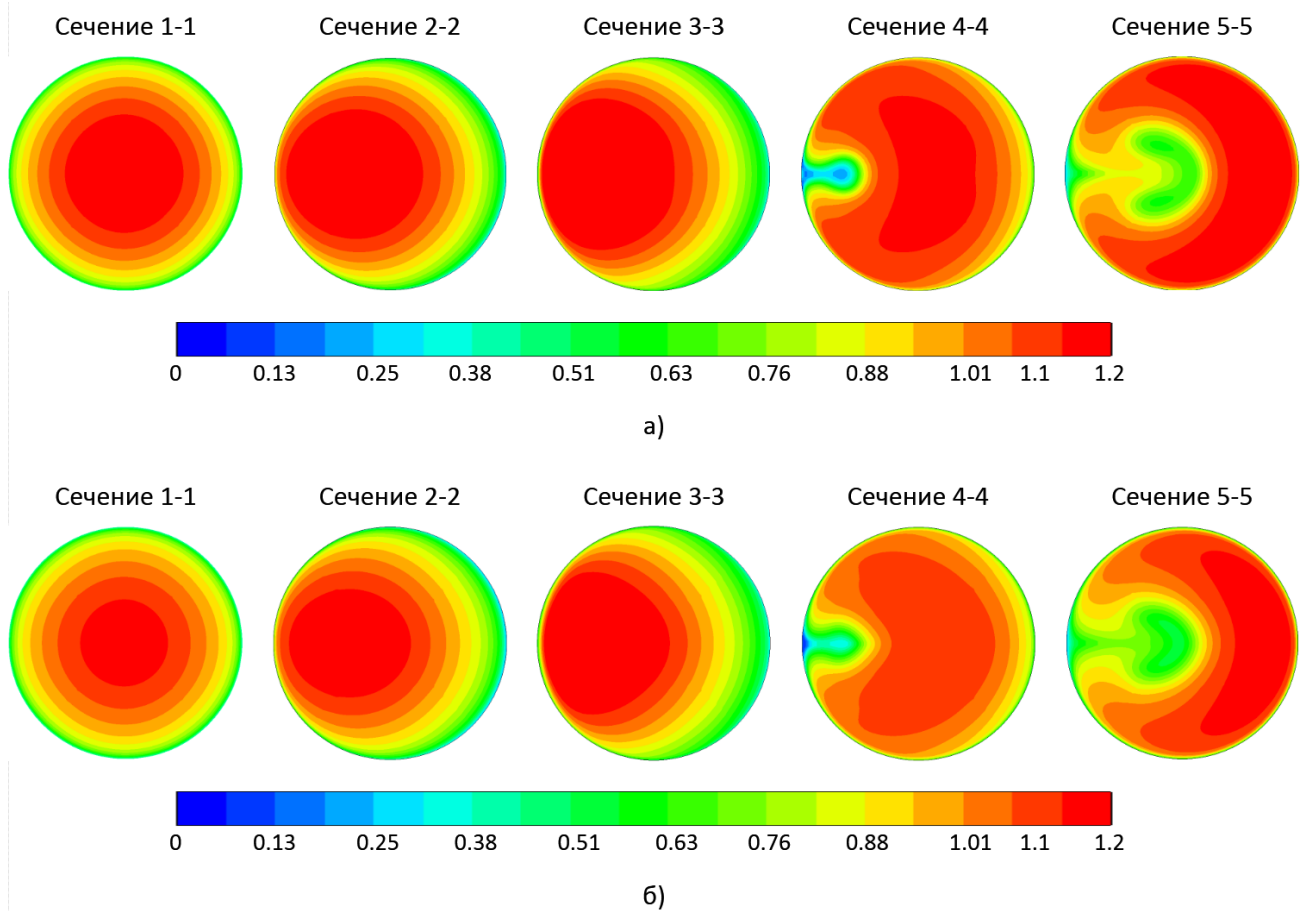


Рисунок 2.19 Поля относительной скорости в поперечных сечениях криволинейного канала с использованием а) SA модели турбулентности б) SST модели турбулентности

Для подробного изучения изменения профиля скорости были построены графики в пяти разных точках, схема расположения участков исследования также представлена на рисунке 2.18: 1 – область трубы до входа в колено на расстоянии одного диаметра трубы, 2 – область входа в колено, 3 – середина колена, 4 – выходной участок колена, 5 – область, соответствующая сбору экспериментальных данных. По этим линиям построены поперечные сечения, которые представлены на рисунке 2.20.

Как видно из представленных результатов на участке изгиба канала происходит перестройка структуры потока. Перед изгибом, в сечение 1-1, структура потока имеет симметричный вид. По мере движения газа вдоль колена (сечения 2-2 и 3-3), в следствие искривления течения потока появляется центробежная сила, повышающее статическое давление, которое направлено от центра кривизны к внешней стенке, что приводит к перепаду давления по сечению трубы и, соответственно, изменению скорости. В области у внешней стенки формируется вторичное течение, где вектор скорости сильнее направлен к внешней поверхности канала. Образующееся вторичное течение, за счет увеличения масштаба турбулентности и силы трения по мере движения потока увеличивается в размерах и оттесняет к внутренней стенке центральную часть потока, которая имеет максимальную скорость и малые масштабы турбулентности. При дальнейшем движении, за счет увеличения масштаба турбулентности и трения на внутренней поверхности канала за коленом, происходит образование вторичного течения, которое оттесняет поток к внешней поверхности. В следствии этого, за поворотом поток с максимальной скоростью занимает большую площадь у вогнутой поверхности, поглощая область вторичного течения у выпуклой поверхности (сечение 4-4 и 5-5). Здесь характер течения меняется на противоположный: диффузорный эффект у внутренней поверхности, а конфузорный у внешней поверхности канала. Сразу за поворотом канала, на выпуклой поверхности в плоскости симметрии (сечения 4-4) намечается точка отрыва пограничного слоя, в окрестности которой скорость обращается в ноль не только на поверхности канала, но и в ближайших точках по расстоянию от поверхности. При этом возвратного течения, где маршевая компонента вектора скорости меняет направление в расчетах не наблюдалось. Исследованный характер течения за рассматриваемой точкой, эквивалентен обтеканию выступающей тонкой иглы, которая разделяет поток на два симметричных винтообразных вихревых потока. Полученные результаты показывают, что на входе в зону поворота основной поток проходит по наименьшей траектории, образуя повышение скорости в области

внутренней стенки, а плавное скругление внешней стенки канала минимизирует образование вихревой зоны. Относительно выхода из зоны поворота наблюдается образование большой вихревой зоны, которая приводит к закручиванию потока.

По аналогичным точкам были построены распределение расходной составляющей скорости на различных участках конструкции в области колена относительно плоскости симметрии (рисунок 2.20). Сравнение расчетного графика и экспериментальных точек показывает их определенное совпадение за малым исключением в области внутренней стенки. Расчет с моделью турбулентности SST показывает большую согласованность в области вторичного течения.

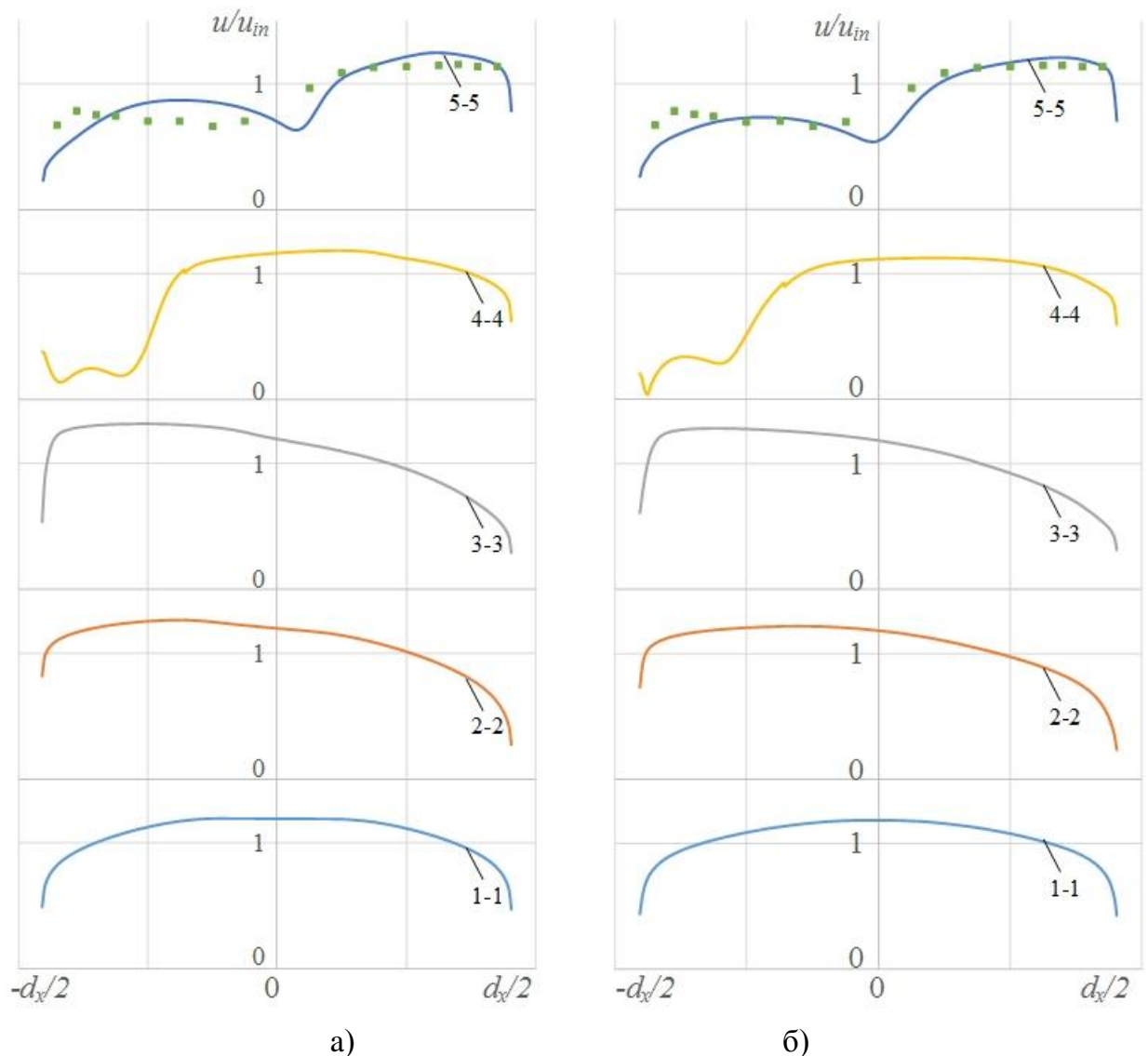


Рисунок 2.20 – Профили относительной величины расходной составляющей скорости на различных участках конструкции в области колена с использованием а) SA модели турбулентности б) SST модели турбулентности по пяти сечениям, точки – экспериментальные данные

При анализе этих результатов выявлено, что в обоих расчетах существенная перестройка течения наблюдается уже за поворотом. Образование вихревой зоны в области внутренней стенки проявляется после прохождения потока более 60% поворота (угол поворота 60°). В данной области формируется вторичное течение, которое по мере продвижения вниз по потоку распространяется на весь диаметр трубы, тем самым закручивая основной поток с двух сторон относительно плоскости симметрии.

Как было показано выше, за поворотом происходит активное развитие вторичного течения, которое оказывает существенное влияние на основной поток, придавая линиям потока винтообразный характер. Подробно о данном явлении рассказывается в [125].

С целью исследования формирования траекторий закручивания потока, а также исследования взаимодействия основного и вторичного потоков на уровне получения однородного профиля скорости, были рассмотрены 7 точек. Схема размещения выбранных точек представлена на рисунке 2.21. Три точки размещаются в области образования вторичного течения (точки 1-3), две точки описывают зону основного потока (точки 4-5) и две точки выбраны в области внешней стенки, которые описывают вихревую зону, порожденную данной стенкой (точки 6-7). В установившемся движении, когда скорость не зависит от времени, линия тока совпадает с траекторией частиц. Так как анализ основывается на RANS расчетах стационарного режима, для выбранных точек достаточно построить линии тока от выхода из колена вниз по прямолинейной конструкции длиной 100 диаметров трубы.

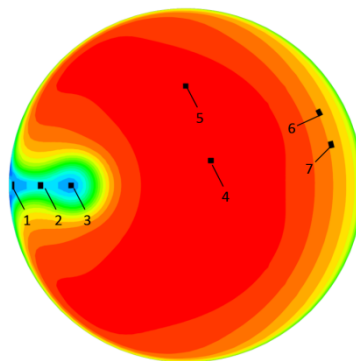


Рисунок 2.21 - Разметка точек для исследования траекторий движения потока

На рисунках 2.22 и 2.23 представлены проекции траекторий относительно распространения течения вниз по потоку и поперечного сечения исследуемых точек для модели турбулентности SA и модели турбулентности SST, соответственно. Полученные резуль-

таты демонстрируют винтообразный характер течения и симметричность течения относительно продольной плоскости. При этом из графиков траекторий, построенных относительно продольной оси видно, что винтообразность течения сохраняется на расстоянии 40-45 диаметров трубы.

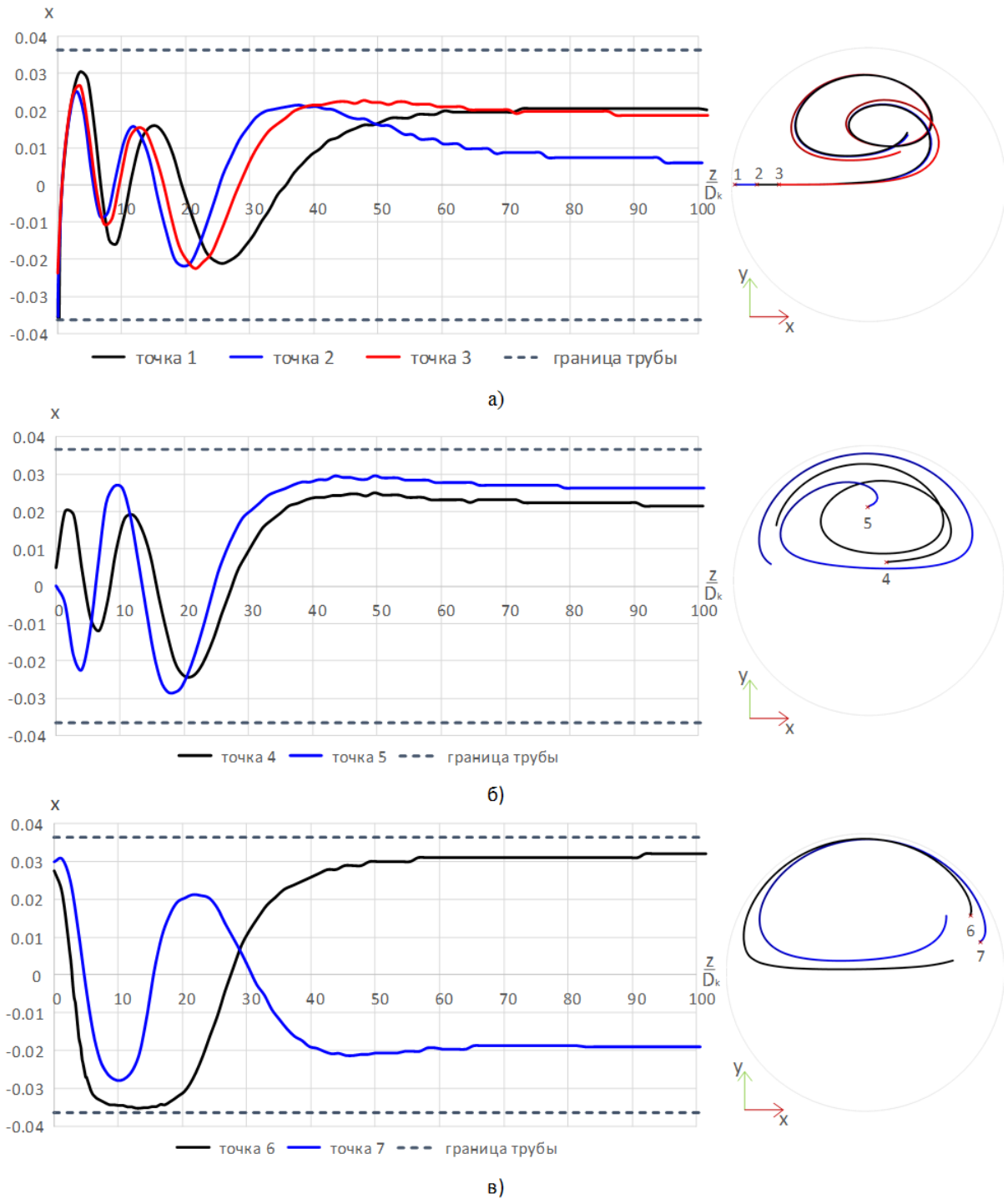


Рисунок 2.22 Проекции траекторий точек, находящейся за поворотом с использованием модели турбулентности SA при интенсивности 10% и длине перемешивания 1 мм: а) область вторичного вихря, б) область основного потока, в) область пограничного слоя вблизи внешней стенки

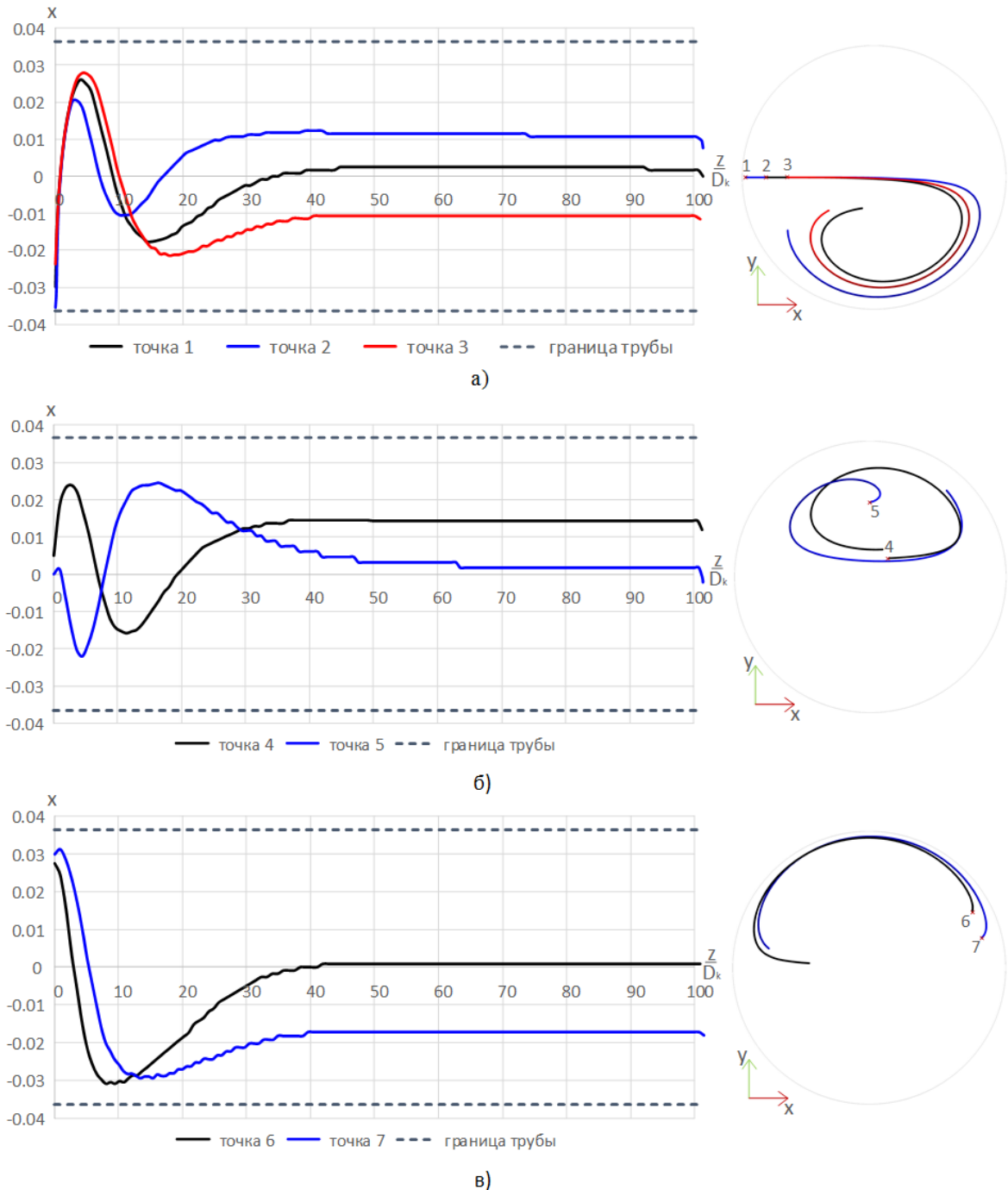


Рисунок 2.23 Проекция траекторий точек, находящейся за поворотом с использованием модели турбулентности SST при интенсивности 10% и длине перемешивания 1 мм: а) область вторичного вихря, б) область основного потока, в) область пограничного слоя вблизи внешней стенки

Более подробно рассмотрим результаты с целью сравнительного анализа поведения вещества в канале. Для этого в сечении, где намечалась точка отрыва пограничного слоя, были поставлены лагранжевые частицы. На рисунке 2.24 показана расстановка частиц в этом сечении и их нумерация. По расчетным полям были вычислены траектории

движения частиц, которые иллюстрируются на рисунке 2.24. Из представленных результатов видно, что течение за коленом состоит из двух зеркально симметричных вихревых движений, что соответствует литературным данным [42]. Проведенный анализ полученных результатов показал, что движение лагранжевых частиц носит винтовой характер. В верхней части потока частицы вращаются против часовой стрелки, а в нижней по часовой стрелке. При этом частицы 1 и 2, которые находились в области вторичного течения около намечающейся точки отрыва, по винтовым траекториям попадают в центры вихревых потоков, где происходит их перемешивания, соответственно, с частицами 3, 4 и 9, 10, которые находились в центральной части вихревых потоков. Частицы 5, 6 и 7, 8, которые находились около поверхности канала в частях вихревых потоков с максимальной маршевой скоростью, совершают винтовое движения по поверхностям вихревых потоков. Получающееся вихревое движение приводит к существенному перемешиванию потока, что существенно может сказаться на качестве лазерного излучения, проходящего через газовый поток в области резонатора.

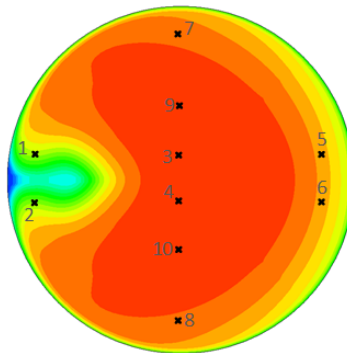


Рисунок 2.24 Разметка точек в начальном сечении

Рассмотренные ранее траектории движения по RANS подходу указывают на симметричность картины течения относительно центральной плоскости, образуя два зеркально симметричных вихревых движения. В реальной жизни система ведет себя не симметрично, но осредненные по времени траектории частиц имеют схожую структуру, что и в RANS. Данное явление показано на рисунке 2.25.

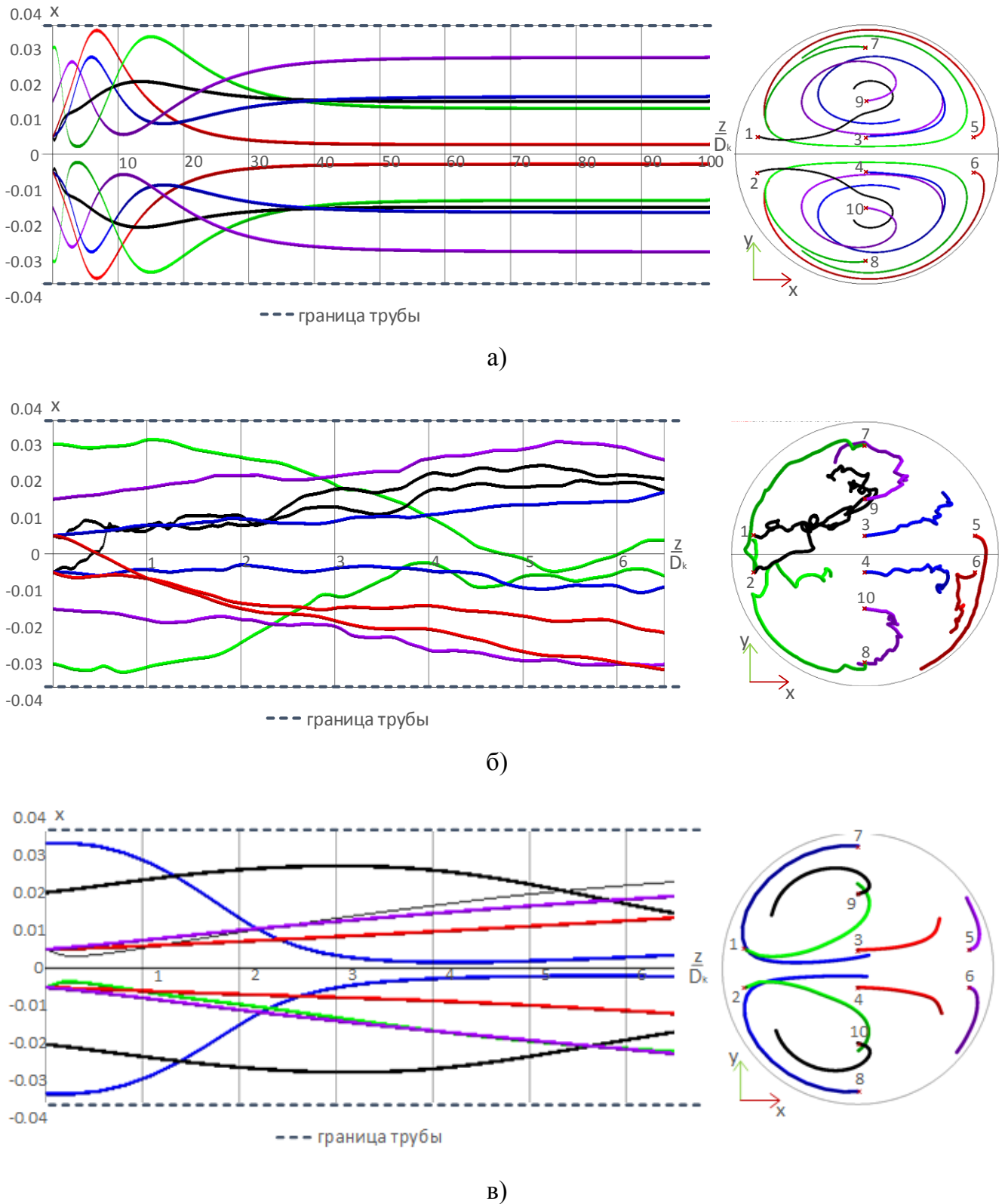


Рисунок 2.25 Сравнительный анализ траекторий движения для RANS (а), вихреразрешающего (б) и осредненные по времени показатели в вихреразрешающем (в) подходов

Как уже отмечалось, в проточных газовых лазерах с замкнутым циклом, важной задачей является оценка газодинамических возмущений потока в области резонатора. Для

оценки влияния вихревых зон на структуру потока, при моделировании турбулентных течений используются тензорно-инвариантные величины завихренности и деформации [127], которые являются составляющими тензора градиента компонент скорости.

Для задач расчета внутренних течений предпочтительно использовать модуль тензор завихренности $\|\Omega\|$, которым параметр Ω наглядно показывает характер турбулентного потока [127].

$$\Omega = \frac{1}{2} [\nabla v - (\nabla v)^*], \quad (2.9)$$

Компоненты тензора завихренности находятся из соотношений

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.10)$$

Завихренность представляет собой свойство движения вещества, при котором в среде существуют вращающиеся элементы объема. Количественной мерой завихренности служит ротор скорости (вектор скорости).

$$\omega = \nabla \times v, \quad (2.11)$$

Компоненты тензора вращения выражаются через компоненты вектора завихренности.

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

Для осредненной оценки уровня завихренности используется следующая формула:

$$\Omega = \frac{\int rot u ds}{ds} \cdot \frac{d_x}{u} \quad (2.13)$$

где $\bar{u} = \frac{\int u ds}{ds}$.

Данный коэффициент является безразмерным и может являться оценкой для различного масштаба.

Для оценки уровня завихренности потока было проведено численное моделирование течения за коленом в прямолинейной трубе, длиной в 100 диаметров трубы. На рисунке 2.26 представлены графики изменения уровня осредненного по сечению модуля тензора завихренности. Для сравнительного анализа на этом рисунке приведен график уровня завихренности невозмущенного потока.

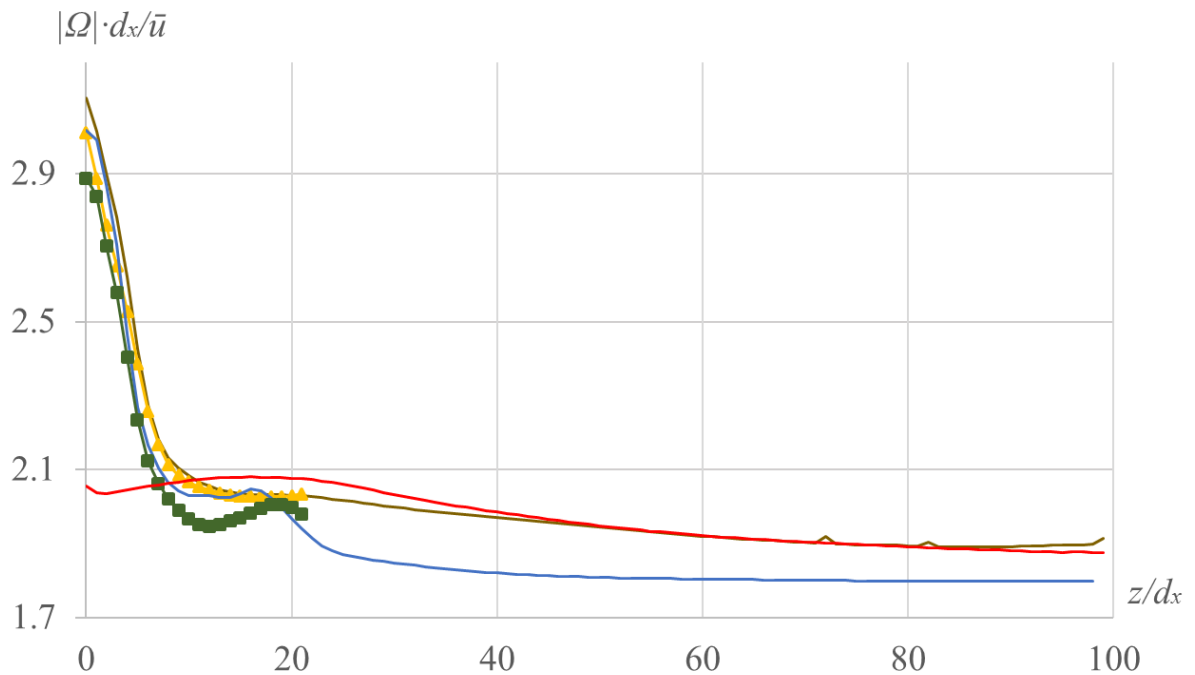


Рисунок 2.26 График распределения уровня завихренности вниз по потоку. Коричневой линией отображены результаты с моделью турбулентности SST It - 10% lt - 1 мм, синей - модель турбулентности SA It - 10% lt - 1 мм, желтой - модель турбулентности SST It - 10% lt - 5 мм, зеленой - модель турбулентности SA It - 10% lt - 5 мм, красной – труба с однородным потоком

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что порожденное поле завихренности за рассматриваемым коленом существенно проявляется на расстоянии 20 диаметров трубы. При варьировании начальных турбулентных параметров и граничных условий существенных изменений в уровне завихренности не наблюдалось.

Таким образом, уровень завихренности напрямую зависит от градиента скорости. Для оценки уровня завихренности потока используем понятие осредненного показателя модуля завихренности. На рисунке 2.26 представлена оценка уровня завихренности, который рассчитывался в прямолинейном канале за поворотом в поперечных сечениях с периодичностью одного диаметра трубы на расстоянии 100 диаметров трубы.

Для сравнительного анализа был проведен расчет для обычной цилиндрической трубы с однородным потоком на входе. График распределения уровня завихренности также представлен на рисунке 2.26.

Показано, что порожденное поле завихренности исследуемым конструкционным изменением сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы. При варьировании начальных турбулентных параметров и граничных условий существенных изменений в уровне

завихренности не наблюдается.

2.7 Вывод по второй главе

Основные результаты данной главы можно сформулировать следующим образом:

1 Численно исследованы характеристики течения турбулентного потока для экспериментальной установки с использованием RANS и вихреразрешающего подходов. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных структуры течения за коленом. Установлено, что осредненные параметры потока в нестационарной постановке с использованием вихреразрешающей модели турбулентности качественно и количественно лучше совпадают с экспериментальными данными по распределению модуля скорости за поворотом, которые были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

2 Из анализа численных результатов наблюдается формирование вихревой зоны в области внутренней стенки после прохождения потока более 60% колена, которая приводит к формированию вторичного течения.

3 Влияние вторичного течения на основной поток сохраняется на расстоянии 40-45 диаметров трубы.

4 В RANS постановке подтверждена структура потока за поворотом, состоящая из двух зеркальных потоков относительно плоскости симметрии, в которых траектории движения частиц носят характер спиралей, что соответствует литературным данным. В верхнем потоке вращение лагранжевых частиц идет против часовой стрелки в нижнем по часовой стрелке.

6 В вихреразрешающем подходе получено, что расчетное движение частиц носит стохастический характер. Осредненные параметры дают зеркально-симметричную картину течения, что соответствует решению, полученному по RANS подходу. Из этого делается предположение, что в фазовом пространстве линии тока осредненного по времени течения являются аттракторами траекторий отдельных частиц потока.

5 Порожденное поле завихренности конструкционным элементом (коленом) сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы. При варьировании начальных турбулентных параметров и граничных условий существенных изменений в уровне завихренности не наблюдается.

Глава 3 Численное моделирование характеристик газодинамических течений в открытопористой структуре

3.1 Введение

В данной главе описываются результаты исследования течения на микроуровне в каналах с открытопористыми структурами и за ними на некотором расстоянии. Объектом исследования стал фрагмент открытопористой структуры из сетчатого материала. Приводятся принципы построения пористой структуры, а также оценка неоднородности образца. Полученный образец верифицируется с реальным образцом по данным рентгенографии.

Описаны результаты мелкомасштабных пульсаций за пористой структурой, которые получены методом численного моделирования «впрямую». Проводится оценка спутного следа с использованием спектрального анализа возмущений.

На основе постановки на микроуровне получены вязкостный и инерционный коэффициенты для описания среды на макроуровне.

Рассматривается влияния пористого тела на диффузионное перемешивание двух компонент потока в контексте микромоделей. Получен эффективный коэффициент диффузии для пористой среды.

3.2 Постановка задачи

Для изучения процесса снижения неоднородности потока и диффузионного перемешивания необходимо рассмотреть течение смеси в канале, содержащей открытопористую структуру. Типичная расчетная геометрия показана на рисунке 3.1. В расчетах рассматривается пористая вставка типа ПСМ, в которой должны быть определены коэффициенты, связанные с этой пористой структурой.

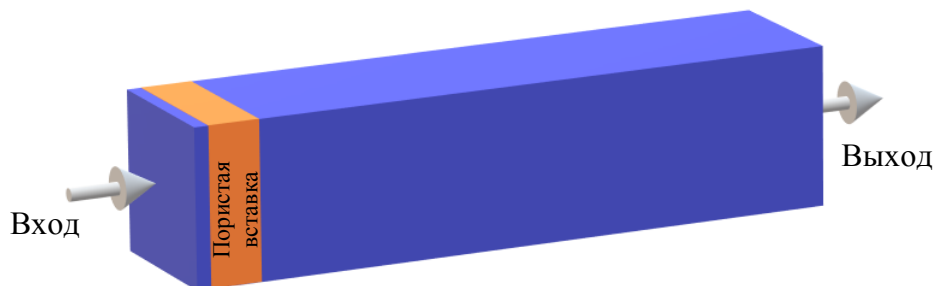


Рисунок 3.1 Геометрия задачи

Математическое моделирование течений в каналах с пористыми вставками основывается, как правило, на использовании фильтрационных макромоделей, в которых возникающее трение при взаимодействии потока с каркасом пористого материала описывается тензором проницаемости. Определение коэффициентов тензора проницаемости связано с этой пористой структурой. Результаты численного моделирования структуры потока при таком подходе, существенно зависят от адекватности описания пористого материала тензором проницаемости. Получить коэффициенты данного тензора можно из эксперимента. Другой подход, позволяющий правильно описать структуру потока в каналах с пористыми вставками, основывается на моделировании в микромасштабе, из которого также можно получить параметры для моделирования в макромасштабе.

Критически важным аспектом при решении задач на микроуровне является точность построения расчетной сетки, которая в свою очередь зависит не только от критериев выбора сеточного разрешения, но и от адекватности построения геометрического каркаса исследуемого объекта. В зависимости от сложности исследуемого объекта построение геометрического каркаса проводится с помощью либо штатных модулей комплекса инженерных расчетов, либо с использованием специализированных САД-пакетов.

В данной работе пористая вставка представляет геометрически сложный объект, требующий аккуратного моделирования. Так как масштабы микромоделей геометрии очень малы на каждом этапе построения геометрической модели автором проводилась оценка погрешности по структуре и геометрии исследуемого образца. Необходимость проведения оценки погрешности напрямую связана с оценкой точности газодинамических характеристик для конкретной модели пористой вставки. Поэтому для построения геометрической модели используются следующие этапы:

1. Построение модели с использованием отечественных САД-пакетов T-Flex САД компании «Топ-системы» [128] и Компас компании «Аскон» [129]. В САД-пакетах производится построение твердотельной модели каркаса пористой вставки.
2. На основании построенной детали производится построение газодинамической модели с использованием САД-пакетов.
3. Сопоставительный анализ достоверности полученных 3D моделей с экспериментальным образцом. Анализ проводится на основе вычисления коэффициента пористости относительно площади входного и выходного сечений с последующим вычисле-

ние объема содержания ячейки и определения отклонения от экспериментального образца. Экспериментальный образец оценивался путем просвечивания рентгеном с последующей обработкой результата по оценки пористости.

3.3 Построения микромоделей пористой вставки

Обычно пористые тела классифицируют по размерам пор, величине пористости, распределением пор в пространстве и их форме. Эти параметры определяют такие свойства, как прочность, электро- и теплопроводность, гидравлическая прочность, фильтрационные характеристики и т.д.

В технике и науке используются как упорядоченные, так и неупорядоченные (хаотические) структуры [9]. В настоящий момент в перспективных разработках используются структуры с высокой пористостью из-за относительно низкого гидравлического сопротивления.

Для получения однородного профиля скорости в потоке газодинамического контура лазера с замкнутым циклом практический интерес представляют открытопористые вставки нескольких типов:

1. «Металлорезина» (МР) - это металлическая структура, которая получается путем прессования навитой в спираль проволоки в нужную форму [130] (рисунок 1.2, г).

2. Пористый сетчатый материал (ПСМ) – это металлическая структура, которая получается путем наслоения друг на друга сеток полотняного плетения (рисунок 1.2, д) с последующим спеканием и обрезкой под нужную форму [131].

Теоретическое исследование газодинамических течений в пористых структурах проводится на основе уравнений газодинамики (уравнения непрерывности, движения и сохранения энергии [89]). Математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Поэтому вводятся различного рода допущения и полуэмпирические зависимости, например, для коэффициентов переноса, которые входят в свою очередь в уравнения и граничные условия.

Для определения указанных коэффициентов и констант необходимо экспериментальное исследование, дающее информацию о гидравлическом сопротивлении, механизме и интенсивности теплопереноса при движении теплоносителя в пористых структурах для замыкания математической модели.

К сожалению, не всегда есть возможность проведения эксперимента, и в этом случае сквозное численное моделирование течения через пористую структуру является хорошей альтернативой. В данном подходе важную роль играет формирование цифрового двойника пористой структуры.

3.3.1 Объект исследования

С точки зрения построения трехмерной модели в какой-либо системе автоматизированного проектирования (САПР или CAD), алгоритм создания структуры типа МР представляется достаточно сложным и трудоемким процессом, так как каналы для прохождения потока ведут себя стохастически. Структура типа ПСМ для проектирования представляется более простым вариантом. Поэтому для дальнейшего исследования автором был рассмотрен именно этот вариант пористой структуры.

При построении 3D модели структуры типа ПСМ использовалась сетка полотняного плетения (рисунок 3.2, а) по ГОСТ 6613-86[132]. Диаметр проволоки составлял $d_{np} = 0.15$ мм номинальный размер стороны ячейки $a = 0.41$ мм.

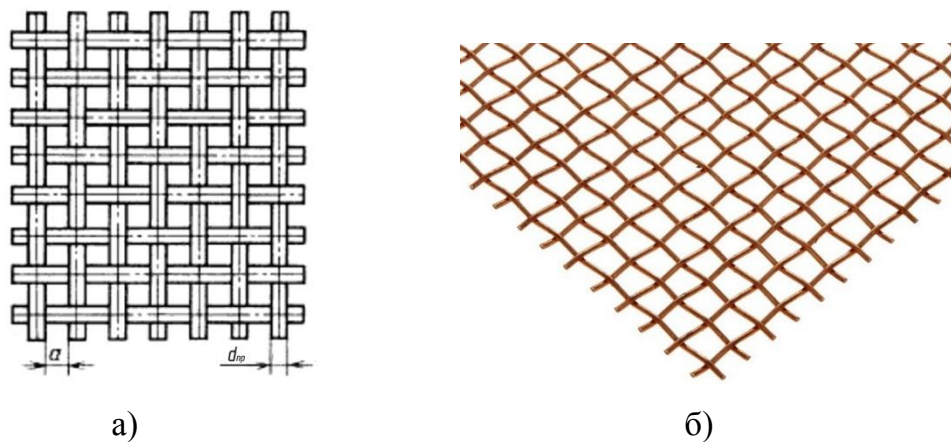


Рисунок 3.2 а) схема плетения; б) вид сетки

Так как расстояние между проволоочными элементами достаточно велико (рисунок 3.2, б), то и в целях создания дополнительного гидравлического сопротивления последующий слой сетки поворачивался на угол 45° относительно предыдущего слоя (рисунок 3.3, а). Недостаток подобной структуры состоит в том, что сохранились сквозные отверстия большего размера. Из практических соображений и с целью хаотизации структуры, помимо поворота сетки, использовалось смещение слоев. Попарно смещались слои

на $\frac{1}{2}$ шага вбок, вниз (рисунок 3.3, б). Габаритный размер исследуемых моделей составлял $6 \times 6 \times 1.7$ мм. Стоит отметить, что в обеих моделях объем, занимаемый металлом одинаков.

Полученная модель является каркасом пористой вставки, которая была построена в отечественных САD-пакетах. На основании этого каркаса производится построение газодинамической модели с использованием также с использованием САD-пакетов.

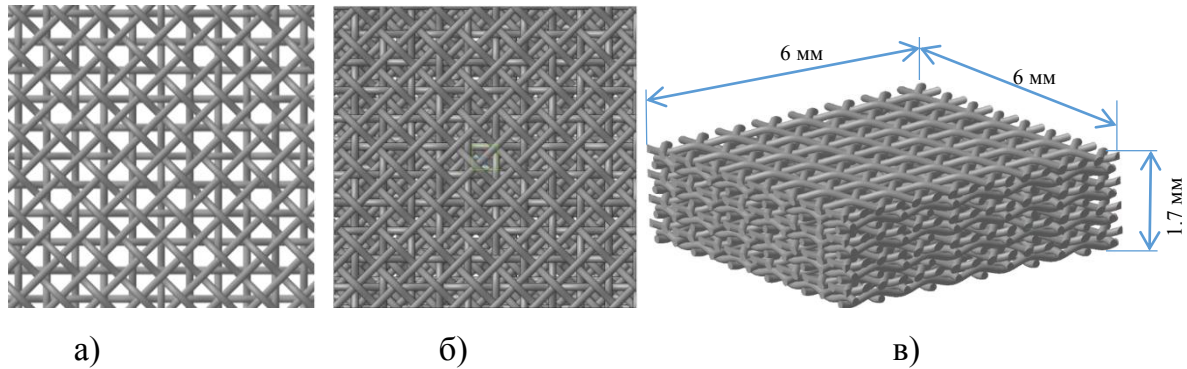


Рисунок 3.3 а) Образец 1 - вид сверху пористой вставки с последующим развернутым на угол 45° относительно предыдущего б) Образец 2 - вид сверху пористой вставки с развернутым вторым слоем на угол 45° и попарно смещенные слои на $\frac{1}{2}$ шага вбок, вниз в) изометрический

Отечественные системы автоматизированного проектирования (САD) не имеют прямой связи с расчетными комплексами. Организация взаимодействия между ними происходит через экспорт и импорт данных аналитической или фасеточной моделей, которые могут привести в случае числовых значений к округлению дробной части, в топологическом случае к искажению поверхностей модели. Для изделий больших размеров подобные искажения сравнительно малы и, как правило, ими можно пренебречь. Для моделей малых размеров и сложных геометрических форм – при перегрузке модели из одной программной среды в другую, искажения оказывают существенное влияние. Поэтому крайне важно уделить внимание оценки погрешности проектируемой модели.

3.3.2 Методика анализа погрешности геометрической модели для исследования на микроуровне

Анализ погрешности полученных образцов основывался на вычислении общего коэффициента пористости, а также изменения локального значения коэффициента пористости на различных участках модели.

Для исследования локальных значений коэффициента пористости был выбран подход разбиения модели по площади на равные части: 4 части (рисунок 3.5, а), 16 частей (рисунок 3.4, б), 64 части (рисунок 3.4, в).

Такой подход был применен ко всем проводимым оценкам пористости.

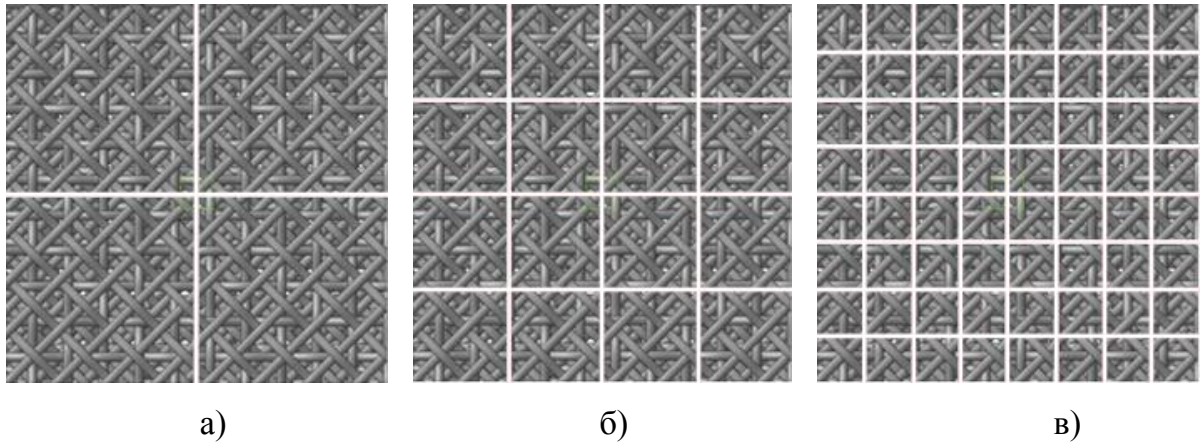


Рисунок 3.4 Исследование неоднородности пористого тела по участкам разбиения модели по площади, а) 4 части, б) 16 частей, в) 64 части

3.3.2.1 Оценка пористости в CAD- системах

Первая методика вычисления основана на расчете объема конструкции пористой вставки. Вычисление объема полученной фигуры после моделирования производится с помощью штатного функционала CAD-системы. Для данного подхода были выбраны два ведущих отечественных программных пакета: Компас 3D и T-Flex CAD.

Подходы вычисления объема модели у данных CAD-системах существенно разные. В программе Компас 3D вычисление объема модели определяется численным интегрированием с помощью теоремы Остроградского-Гаусса, которая сводится к интегрированию по поверхности тела.

$$\int_G \operatorname{div} b \, dG = \int_H (b n) \, dH \quad (3.1)$$

$$\int_G \operatorname{div} R \, dG = 3V = \int_H (Rn) \, dH$$

где G – область, R – вектор от центра ячейки до поверхности, H – поверхность, ориентированная при помощи единичной нормали n [133,134].

Точность численного интегрирования зависит от масштаба разбиения поверхности на элементарные области. В качестве элементарных областей используются треугольные и четырёхугольные элементы, которые получаются триангуляцией каждой грани тела. За

масштаб разбиения поверхности отвечает параметр «Точность вычисления». Данный параметр задает максимально допустимый угол между нормальными в вершинах треугольных и четырёхугольных элементов (в общем случае эти элементы криволинейные) и между касательными векторами к границе грани в вершинах элементов. При максимальном значении точности максимально допустимый угол 0,01 радиана. Зная радиус кривизны $r_{\text{кривизны}}$ поверхности (или её границы), можно оценить размер стороны треугольника (или четырёхугольника) b по формуле [129]:

$$b = r_{\text{кривизны}} \times 0.01 \quad (3.2)$$

Расчет объема модели в программе T-flex CAD производится на основе точного метода интегрирования, в случае если модель представлена в виде аналитической формы (сферы, конусы, торы, цилиндры, плоскости и т.п.), в остальных случаях применяется метод на основе генерируемой сетки геометрических объемов, которые формируются для метода конечных элементов (КЭ). Поэтому геометрические объемы есть конечные элементы, применяющиеся для замены исходной пространственной геометрии сложной формы на дискретную математическую модель и представляющую собой совокупность элементарных объемов заданной формы. Каждый КЭ имеет заранее определённую форму и известны его характеристики. За степень дискретизации исходной модели отвечает параметр «Точность вычислений».

В результате решения систем уравнения сетки КЭ получаются приближённые значения (с точки зрения теоретически возможного «точного» решения соответствующего дифференциального уравнения математической физики), но погрешность решения может быть очень небольшой – доли процента на тестовых задачах, имеющих «точное» аналитическое решение. Погрешность получаемого в результате представления скелета КЭ обычно монотонно уменьшается с увеличением степени дискретизации моделируемой системы. Другими словами, чем большее количество КЭ участвует в дискретизации (или чем меньше относительные размеры КЭ), тем точнее получаемое решение. Естественно, что более плотное КЭ разбиение требует больших вычислительных затрат.

Минимально возможный размер ребра КЭ дискретной модели равен $\sim 10^{-6}$ мм. Непосредственно разбиение зависит от кривизны кривых и поверхностей, составляющих границы тела: чем меньше кривизна, тем крупнее будут элементы дискретной модели и наоборот [128].

3.3.2.2 Оценка пористости расчетной модели

Оценка пористости производилась в системе постобработки комплекса ЛОГОС ScientificView [27,28].

В численном моделировании на неструктурированных сетках используется метод конечных объемов. Данный метод основан на интегрировании исходных дифференциальных уравнений по контрольному объему. Контрольные объемы (ячейка сетки) являются произвольными многогранниками, покрывающие расчетную область без зазоров и наложений. Все искомые переменные определяются в центрах ячеек сетки. Построение сетки подразумевает создание структуры данных, которая содержит списки узлов сетки, ячеек и граней, а также определенные связи между этими списками [27,28].

Данные по каждому контрольному объему хранятся в массиве. Суммирование всех значений ячеек, которые описывают область в пористом теле, позволяет получить общий коэффициент пористости модели.

3.3.2.3 Оценка затраченного материала для изготовления модели

Так как основой исследуемых образцов является сетка, которая изготавливается из проволоки, был проведен расчет длины проволоки, используемой для изготовления образца.

Для первого образца комбинация первого и второго слоя повторяется четыре раза, образуя структуру модели, соответственно, на изготовление такой комбинации, материала потрачено одинаково. Первый слой представляет собой 22 одинаковые проволочки расположенные в продольном и поперечно направлении. Их общая длина составляет 136.09 мм. Второй слой развернут под углом 45° , их общая длина составляет 132.93 мм. Таким образом на изготовление всей модели потрачено 1076.08 мм. С учетом типоразмера, объем занимаемой проволоки равен 19.016 мм^3 . Относительно объема модели коэффициент пористости равен 0.6856. Что соответствует пористости в 68.56 %.

Расчет затраченного материала для образца 2 представлен в таблице 1.

Таблица 1. Расчет затраченного материала для образца 2

	Длина затраченной проволоки на изготовление слоя, мм	Объем, мм ³
Слой 1	136.09	2.4049
Слой 2	132.93	2.3491
Слой 3	133.07	2.3516
Слой 4	121.07	2.1396
Слой 5	126.95	2.2434
Слой 6	132.34	2.3387
Слой 7	126.95	2.2434
Слой 8	132.49	2.3413
Итого	1041.9	18.412

Относительно объема модели пористость составила 69.56 %.

Данная методика подсчета объема материала конструкции идеализирована. На практике картина обстоит несколько сложнее. Допуски из технических условий по изготовлению сеточного материала относительно велики для сеток с мелкими типоразмерами. Допускаемое отклонение от номинального размера для среднего арифметического размера стороны ячейки в свету составляет $\pm 9\%$. Максимальное допустимое отклонение от номинального для размера отдельной увеличенной ячейки в свету 40% [135].

Методом оптической микроскопии выполнены измерения параметров двух образцов медной сетки. Установлено, что размер ячейки обоих изученных образцов одинаков и составляет 0.55×0.55 мм, диаметр медной проволоки – $0.14 \div 0.16$ мм, толщина сетки – $0.22 \div 0.29$ мм.

В виду малого размера исследуемой модели, расчет оценки проводился только для полной конструкции. Методика исследования неоднородности не применялась. Полученные коэффициенты пористости для моделей в последующем анализе считались эталонными.

3.3.3 Результаты анализа

Результаты расчета общего коэффициента пористости для образцов 1 (рисунок 3.3, а) и 2 (рисунок 3.3, б) по всем рассмотренным методикам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значение пористости для образцов 1 и 2, полученные различными методами

Метод	Образец 1	Образец 2
Эксперимент по материалу	68.56 %	69.56 %
Компас 3D	69.38 %	70.5 %
T-flex CAD	68.76 %	69.32 %
ЛОГОС	74.5 %	71.9 %

Из табл. 2 видно, что все построенные геометрические и сеточные модели имеют минимальное расхождение по общему значению пористости. Модели, построенные с помощью программы Компас 3D, имеют относительную погрешность $\varepsilon \approx 1.2\%$ для образца 1 и $\varepsilon \approx 1.35\%$ для образца 2. Модели, построенные с помощью T-flex CAD, имеют относительную погрешность $\varepsilon \approx 0.3\% \div 0.34\%$. Для исследуемых образцов, построенных с помощью комплекса ЛОГОС, относительная погрешность для образца 1 составила $\varepsilon \approx 8.66\%$, для образца 2 $\varepsilon \approx 3.36\%$. Оценка по сеточным моделям напрямую зависит от размера ячейки в сеточной модели. Для первого образца размеры ячейки внутри модели были построены с прогрессией, по итогу привело к существенной разнице по оценки пористости. О втором образце данный эффект был учтен, что привело к сокращению погрешности и более близкому значению пористости по сравнению с другими образцами.

Стоит отметить, что построение геометрии газодинамической модели сложной формы для инженерных расчетов проводится на основе импортируемой твердотельной модели из CAD-пакета. При использовании экспорта и импорта данных из рабочих программ с помощью универсального формата представления данных STEP общий коэффициент пористости каждой модели изменился не менее чем на 1.5 %.

Степень неоднородности образцов исследовалась на разных масштабах. Как уже было сказано ранее, каждый образец модели пористой структуры разбивался по длине и ширине на части 2^n , где n варьировалось от 0 до 3. Для каждой части по формуле (1.1) рассчитывались значения пористости Π и относительное среднеквадратичное отклонение σ :

$$\sigma = \frac{1}{\Pi} \sqrt{\frac{1}{N^2} \cdot \sum_{i,j=1}^N (\Pi(i,j) - \Pi)^2}, \quad (3.3)$$

где N – размерность матрицы, $\Pi(i, j)$ – массив значений пористостей.

На рисунке 3.5 представлен результат расчета для двух исследуемых образцов. По

оси абсцисс приводится масштаб разбиения относительно первоначального размера массива.

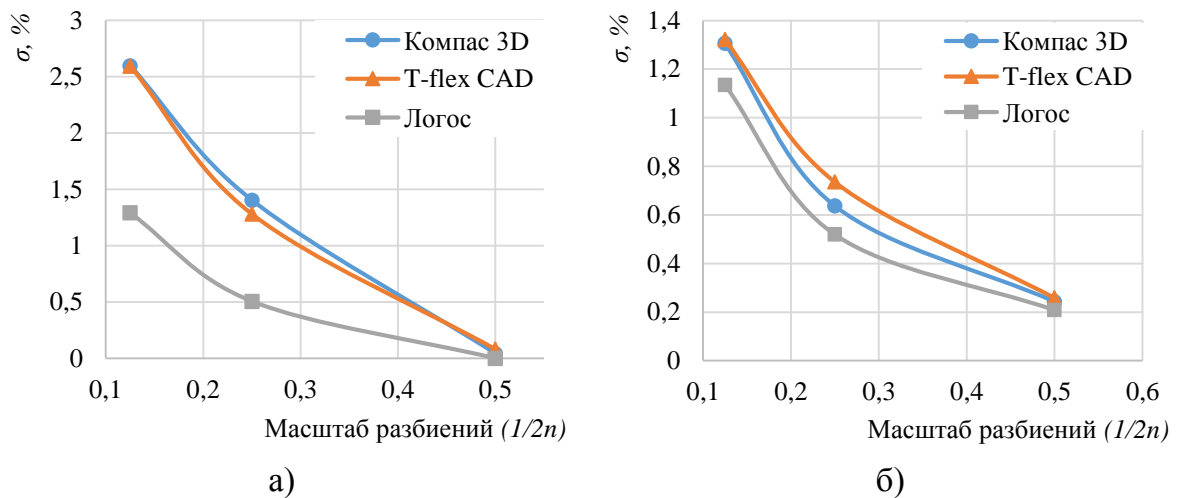


Рисунок 3.5 Относительное среднеквадратичное отклонение объемной пористости для образцов 1 (а) и 2 (б)

На исследуемых масштабах видно - образец 2 обладает значительно меньшей неоднородностью, по сравнению с образцом 1. В целом, результаты, полученные по моделям Компас 3D и T-flex CAD, согласуются и имеют минимальные расхождения. Результаты по моделям ЛОГОСа, имеют расхождения, которые обусловлены построением нерегулярной сетки. Точность проведения вычисления коэффициента однородности пористого тела определяется масштабом ячейки расчетной модели. Как правило, это ячейки, описывающие область пограничного слоя.

Определение степени однородности на разных масштабах для моделей из конструкторских пакетов проводится вручную, а для модели из комплекса ЛОГОС – программно. Поэтому оперируя массивом значений контрольных объемов и центрами ячеек, проведена обработка разбиения массива 600×600 точек с шагом разбиения 10 мкм. Полученные массивы распределения представлены в виде поверхности на рисунке 3.6 для образцов 1 и 2. Из рисунка видно, что интервал изменения коэффициента пористости в образце 1 в максимальных пределах от 0 до 1. Это говорит о том, что модель пористого тела образца 1 не однородна и имеет участки, полностью занятые каркасом пористой вставки (соответственно пористость в данных областях равна 0), а также сквозные участки. Интервал изменения коэффициента пористости в образце 2 в 2 раза меньше, чем у образца 1. Это говорит о том, что модель пористого тела образца 2 более однородна.

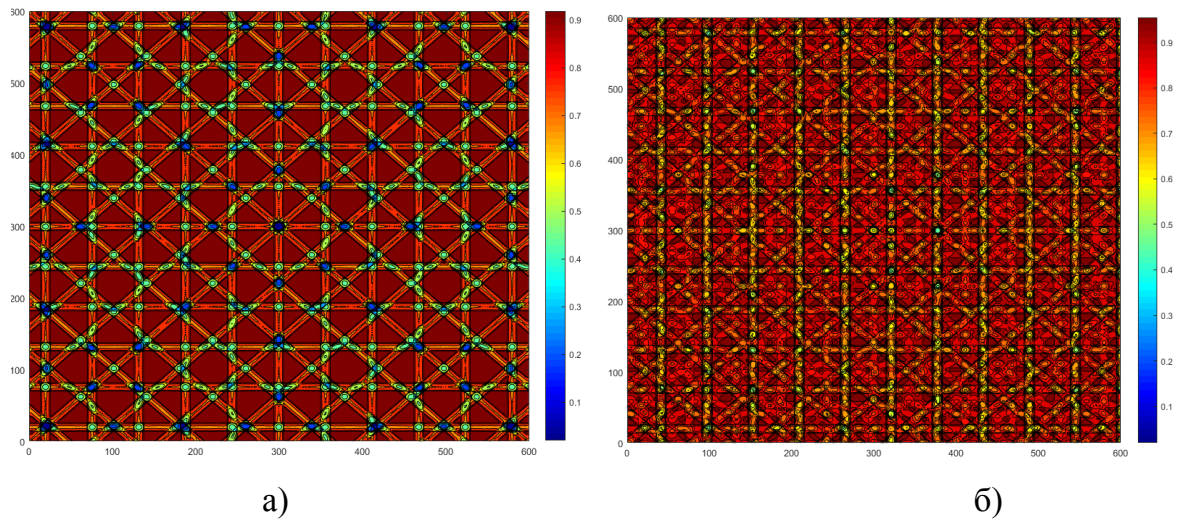


Рисунок 3.6 Распределение коэффициента пористости в разбиении 600×600 для образца 1 (а) и образца 2 (б)

В процессе верификации микромоделей открытопористой структуры было выполнено сравнение экспериментального образца и образцов газодинамической 3D модели, созданных для инженерных расчетов в отечественном программном комплексе ЛОГОС.

Процесс верификации микромоделей заключался также в оценке степени неоднородности образцов на разных масштабах и плотности вероятности на максимальном масштабе разбиения.

На рисунке 3.7 представлен результат расчета среднеквадратичного отклонения для экспериментального образца и микромоделей образцов 1 и 2. По оси абсцисс проводится масштаб разбиения относительно первоначального размера массива.

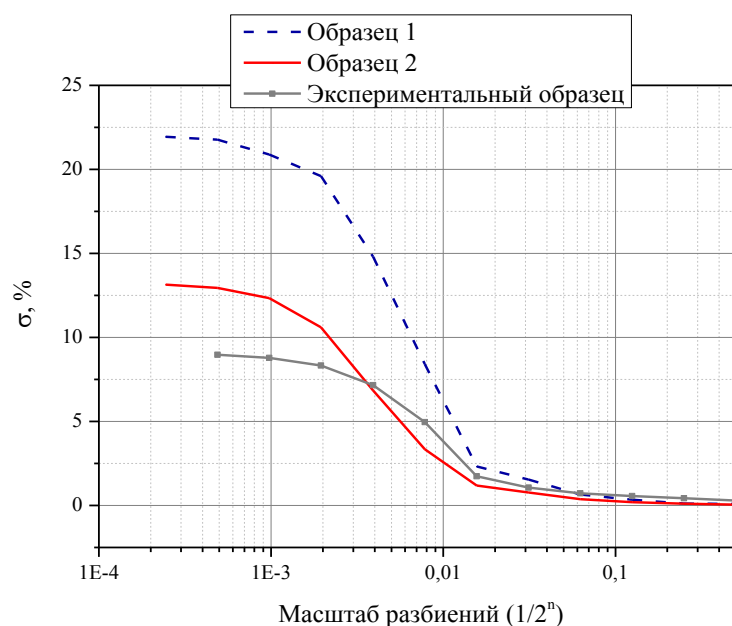


Рисунок 3.7 Относительное среднеквадратичное отклонение объемной пористости

Из рисунка видно, что для относительно крупных масштабов разбиений $0.015 \leq 1/2^n \leq 0.5$ показатели близки друг к другу что говорит о значительно меньшей неоднородности. На более мелких масштабах $1/2^n < 0.015$ исследуемые образцы имеют существенные расхождения в показателях. При этом различие показателя σ , на более мелких масштабах, показывает, что образец 2 значительно ближе по показателям к экспериментальному образцу, чем образец 1. Это указывает на то, что при компоновке экспериментального образца возможно было допущено смещение слоев.

Оценка плотности вероятности проводилась методикой, описанной выше. Для оценки плотности вероятности использовался массив пористости на максимальном масштабе разбиения. На рисунке 3.8 представлен результат распределения плотности вероятности пористости для экспериментального образца и двух вариантов 3D моделей. Оценка плотности вероятности пористости проводилась на масштабе разбиения с шагом 20 мкм.

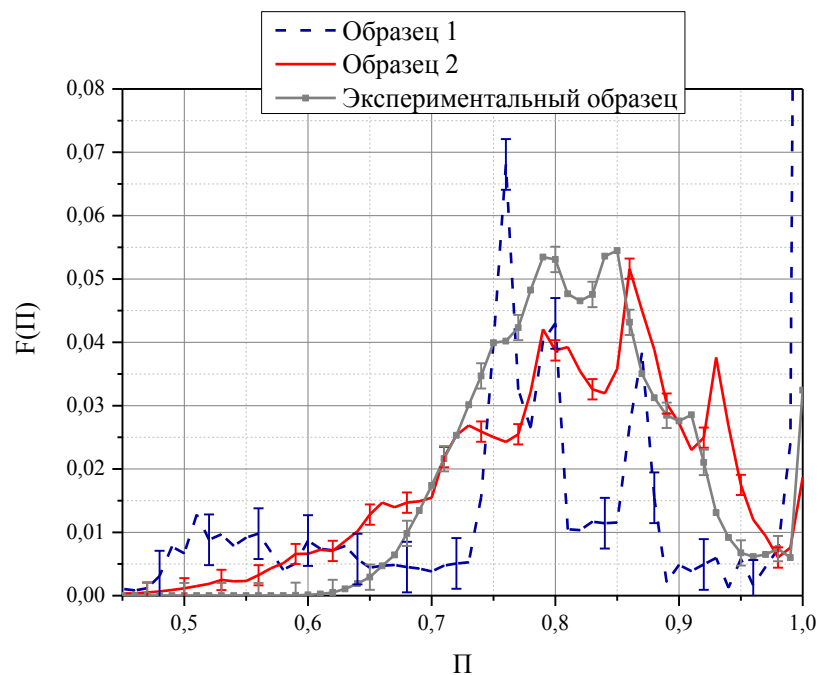


Рисунок 3.8 Распределение плотности вероятности пористости по экспериментальному образцу и 3D моделям образца 1 и образца 2

Из рисунка 3.8 видно, что экспериментальный образец и образец 2 имеют схожую структуру показателей. Значения показателя пористости расположены в интервале 0,7 до 0,92. Ширина на полувысоте для экспериментального образца составила 0,56, для образца 2 – 0,24. Так же отметим, что образец 1 имеет разнородную структуру с преобладанием значительного количества сквозных участков ($F(\Pi=1) = 0.335$).

3.4 Построения сеточной модели для расчетов течений на микроуровне

Для моделирования газодинамики внутренних течений через пористую вставку на микроуровне требуется построение расчетной модели с максимально точной структурой пор. С целью обеспечения полной картины течения на микроуровне, описание пор в расчетной модели должно сопровождаться разбиением на более мелкие ячейки с построением пограничного слоя.

Для построения полномасштабной модели открытопористой вставки потребуется более миллиарда ячеек, поэтому исследование проводилось поэтапно и на фрагменте (рисунок 3.9, а). Исследование характера течения вещества через открытопористую структуру были разделены на две задачи:

1. Моделирование течения через пористую структуру и получение профиля скорости на выходе из ОПС (рисунок 3.9, б).

2. Моделирование спутного следа и исследование процесса затухания порожденных открытопористой структурой вихрей. (рисунок 3.9, в).

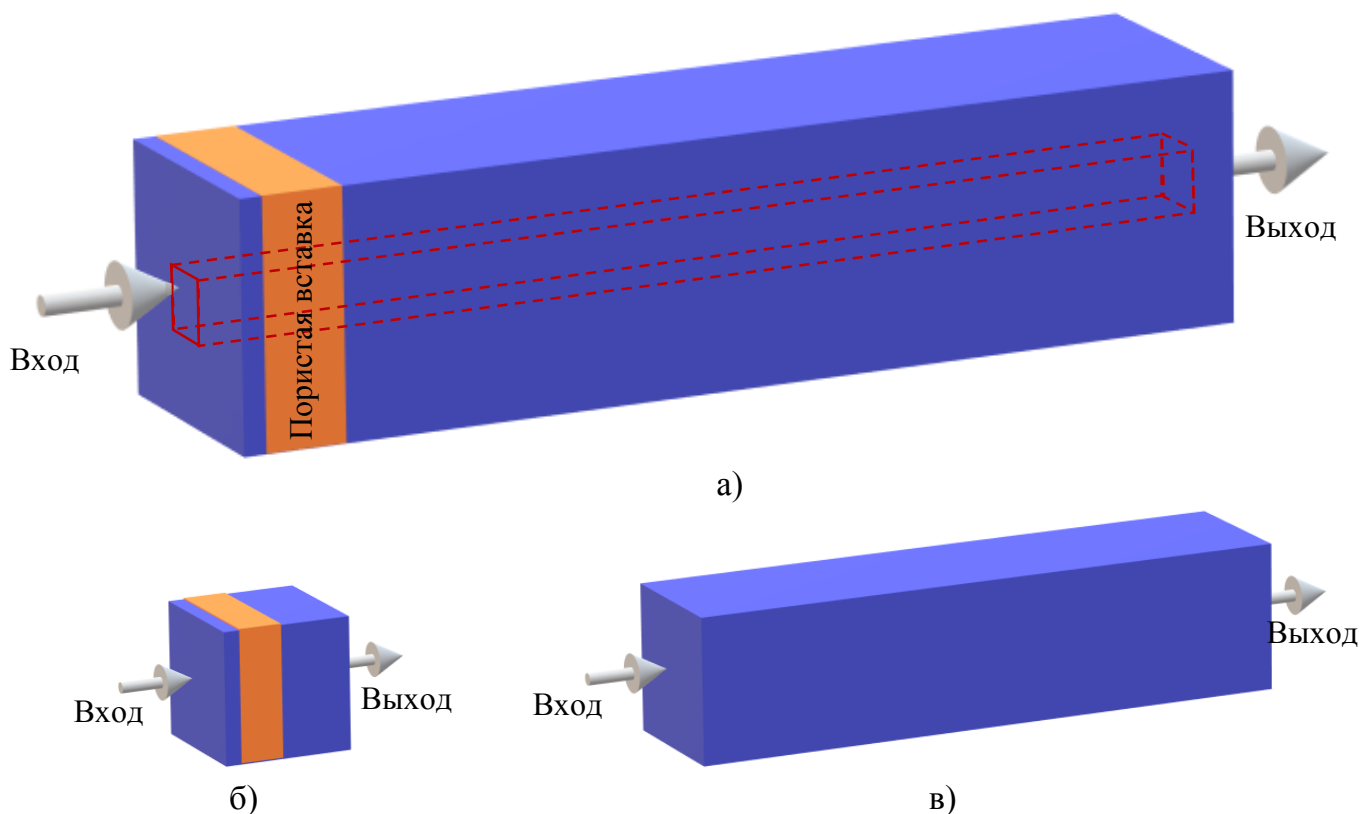


Рисунок 3.9 Адаптация расчетных моделей под аппаратные возможности вычислительных ресурсов: фрагментаризация модели (а) и разделение на функциональные части (б, в)

Первая постановка включала в себя исследование течения через ОПС. Построение расчетной сетки проводилось в несколько этапов: построение внешней поверхности металлической конструкции пористого тела, описанного в п 3.3, и построение газодинамической расчетной модели на основании конструкции пористого тела. Расчетная область для моделирования течения является внешней областью относительно каркаса пористой вставки. Конфигурация расчетной области показана на рисунке 3.10.

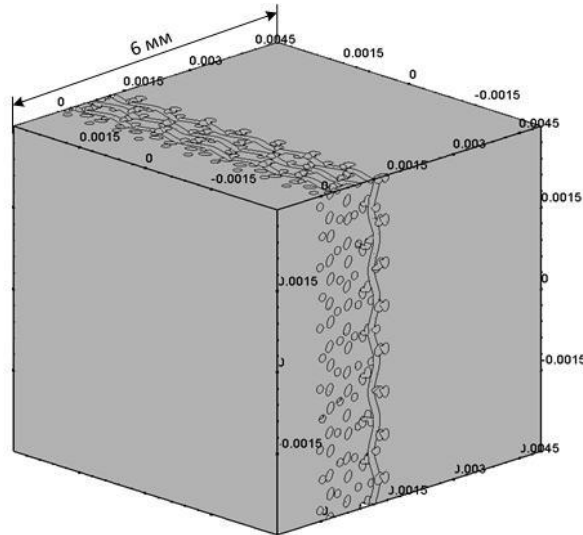


Рисунок 3.10 Полученная газодинамическая модель

Для построения сеточной модели описания течения в пористой вставке используется сеткопостроитель комплекса ЛОГОС, в котором применяется метод построения сетки с отсечением. Суть метода состоит в том, что внутри области строится декартова шестигранная сетка, а в области пограничного слоя – призматическая. На стыке призматического слоя и основной сетки происходит отсечение объемов у основания сетки, которые попадают в призматический слой. Построение призматического слоя основано на сгущении по геометрической прогрессии размера ячеек по направлению к поверхности скелета.

Для данной постановки, построение призматического слоя требуется внутри области пористой структуры. Начальный размер призматического слоя около жесткой стенки скелета пористой вставки полагался равным 1 мкм, а сгущение проводилось по восьми призматическим слоям. Подобного количества слоев достаточно для обеспечения расчета пограничного слоя около каркаса пористой вставки, а также обеспечение качественного перехода к основному ядру потока.

Сеточное разрешение в области основного потока выбирается из возможности

адекватного описания каналов внутренней структуры. Масштаб ячейки в области основного потока полагался равным – 12.5 мкм.

Сеточное разрешение за пористой вставкой с масштабом 12.5 мкм сохраняется на расстоянии ~ 3 калибров. Здесь и далее по тексту под калибром понимается характерный размер поры, который был рассчитан по формуле (1.14). Таким образом количество ячеек в расчетной сетке для моделирования течения через пористую структуру составило $\sim 6.8 \times 10^7$. На рисунке 3.11 показан общий вид расчетной сетки (а) и укрупненный фрагмент сетки вблизи пористой структуры

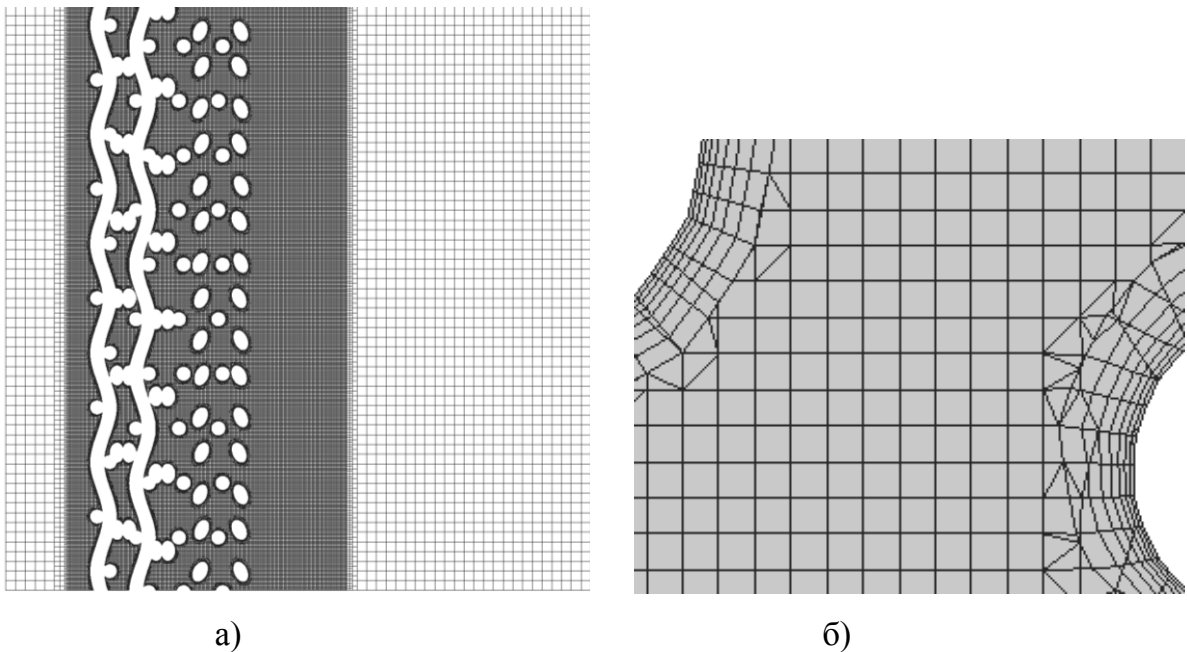


Рисунок 3.11 а) базовая расчетная сетка для задачи течения внутри пористого тела в плоскости симметрии, б) фрагмент сеточной модели в каналах пористой вставки

Вторая постановка включает в себя исследование спутного следа и исследование процесса затухания вихрей, порожденных открытопористой структурой. Исследование проводилось на расчетной геометрии, которая представляет собой параллелепипед, где входная граница имеет такие же размеры, как и выходная граница в задаче моделирования течения через пористую вставку. Длина параллелепипеда составляет 100 калибров. Сеточное разрешение представлено в двух уровнях 12 калибров покрыты сектой в 12.5 мкм, остальная часть сеткой в 100 мкм. Таким образом количество ячеек в модели составило 94×10^6 . Расчетная геометрия представлена на рисунке 3.12.

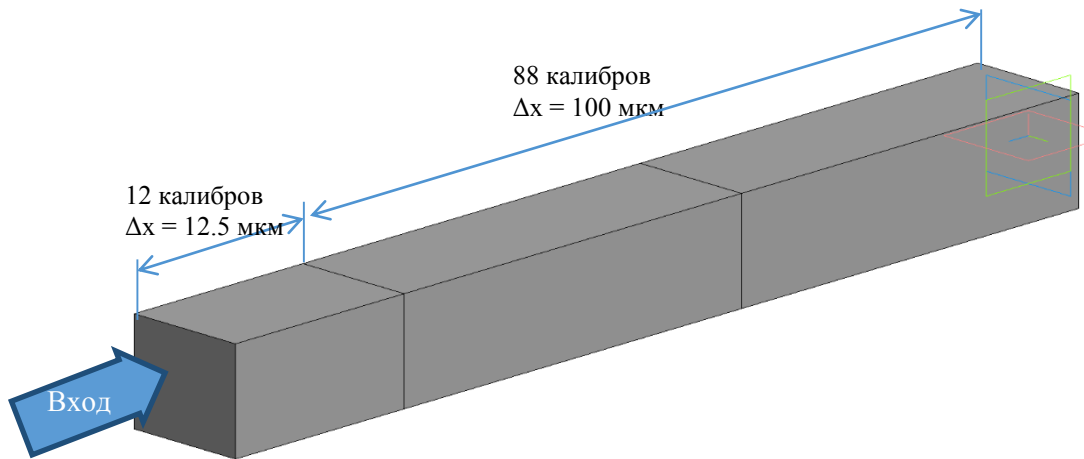


Рисунок 3.12 Базовая расчетная сетка для задачи течения внутри пористого тела в плоскости симметрии

Параметры потока указаны в табл. 3.3. Число Re оценивалось характерного размера поры, рассчитанного по формуле (1.14). Данный параметр составил $d_n = 0.36$ мм.

Таблица 3.3. Параметры течения в задаче численного моделирования течения через пористую вставку на микроуровне

Параметр	Значение	Параметр	Значение
молекулярный вес M	4.026 (кг/кмоль);	теплоемкость C_p	5197 Дж/кг·К;
молекулярная вязкость μ	$1.9891 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$;	коэффициент теплопроводности λ	$0.026 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$;
Скорость набегающего потока u	1-10 м/с	Число $Re(d_n)$	1.78-53.27

На границах области ставились следующие граничные условия:

- на торцевой стороне модели (входная граница) задавались компоненты вектора скорости $u_\infty, v_\infty, w_\infty$, которые, в общем случае, отражают угол входа потока.
- на противоположной границе (выходная граница) ставилось условие Неймана для компонент скорости.
- на стенках каркаса задано условие прилипания потока.
- на боковых - условие симметрии потока.

3.5 Исследование мелкомасштабных пульсаций скорости на микроуровне в следе за пористой вставкой

Основной зависимостью, определяющей режим течения вещества в пористой

вставке, принято считать связь между скоростью движения жидкости в порах и градиентом давления в пористой среде. Для описания закономерностей течения вещества в пористой среде является размеры пор.

Оценивая зависимость отношения градиента давления к толщине пористой вставки от скорости потока, представленной на рисунке 3.13, выявлена нелинейная зависимость, что означает отклонение от ламинарного режима течения. Точками на графике отмечены данные, которые были получены в результате расчетов на микроуровне. Из графика видно, что зависимость $\Delta P/\Delta l = f(u)$ для образца на исследуемом диапазоне нелинейна, это означает, что данный вид зависимости указывает на переходный режим течения вещества в порах.

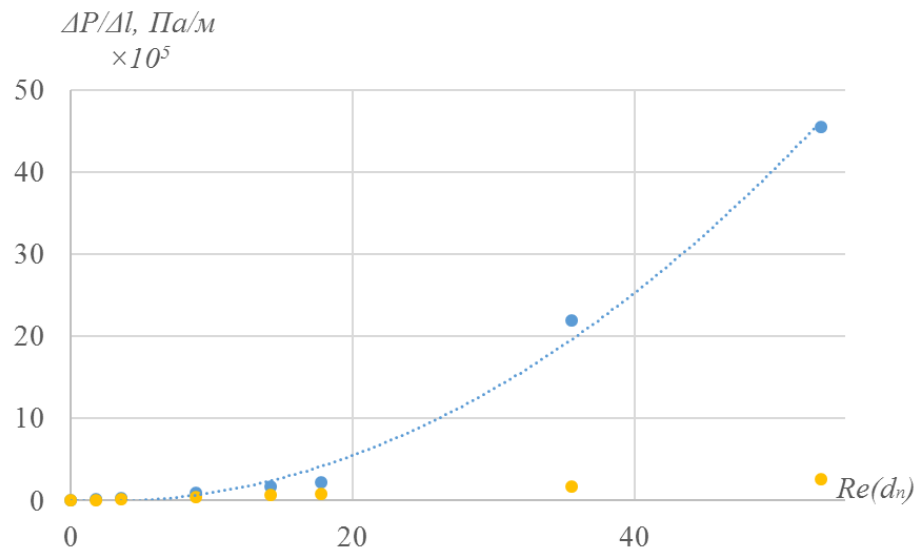


Рисунок 3.13 Зависимость перепада давления от числа входной скорости потока. Синими точками отмечены данные, полученные на микроуровне, желтая кривая – расчет по формуле 1.15 для идеальной пористой среды при ламинарном режиме течения газа.

По результатам численного эксперимента была построена зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса в логарифмических координатах (рисунок 3.14).

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ вычисляется по формуле:

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho u^2 L} \quad (3.4)$$

где L – длина исследуемого образца ОПС (в данном случае 1.68 мм).

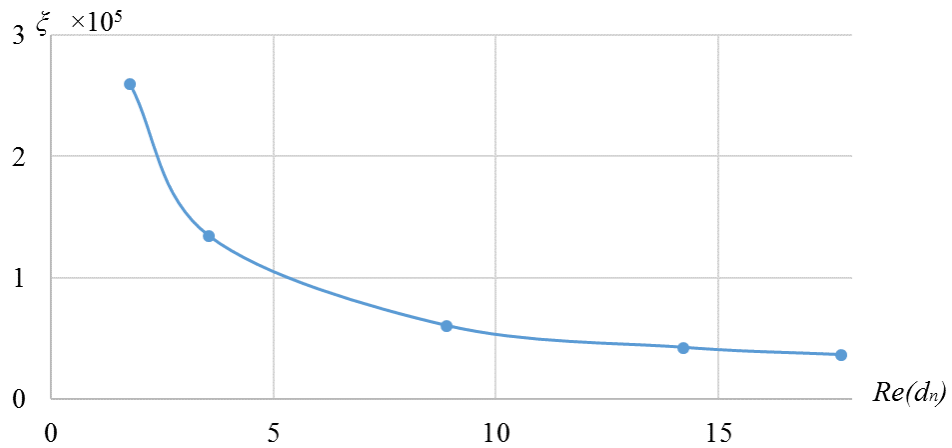


Рисунок 3.14 Зависимость гидравлического сопротивления от Re диаметра поры

Помимо общих характеристик пористого тела не менее значимыми показателями являются градиенты скорости, траектории движения вещества в самом пористом теле. Данные показатели являются ключевыми для получения характеристик пористой среды таких как эффективный коэффициент диффузии, а также вязкостной и инерционный коэффициенты.

Преимущество моделирования на микроуровне заключается в подробном моделировании структуры и наглядной демонстрации распределений компонент вектора скорости внутри модели пористого тела. Для анализа рассмотрены продольные сечения в плоскостях XY и YZ , а также поперечное сечение на выходе из пористой вставки. С точки зрения моделирования внутреннего течения, пористое тело представляет собой сложно разветвленную структуру каналов переменного сечения (см. рисунок 3.15), следовательно, на разных участках пористой вставки будет формироваться свой градиент скорости. На рисунке 3.15 представлено распределение отношения модуля скорости к начальной скорости потока в продольных сечениях модели. Из анализа структуры течения установлено, что в области пористой вставки в исследуемом диапазоне скоростей течение имеет пульсационный характер. За пористой вставкой относительные характеристики потока линейно возрастают с увеличением скоростного напора. В тоже время пульсации набегающего потока перед пористой вставкой с увеличением скорости уменьшаются.

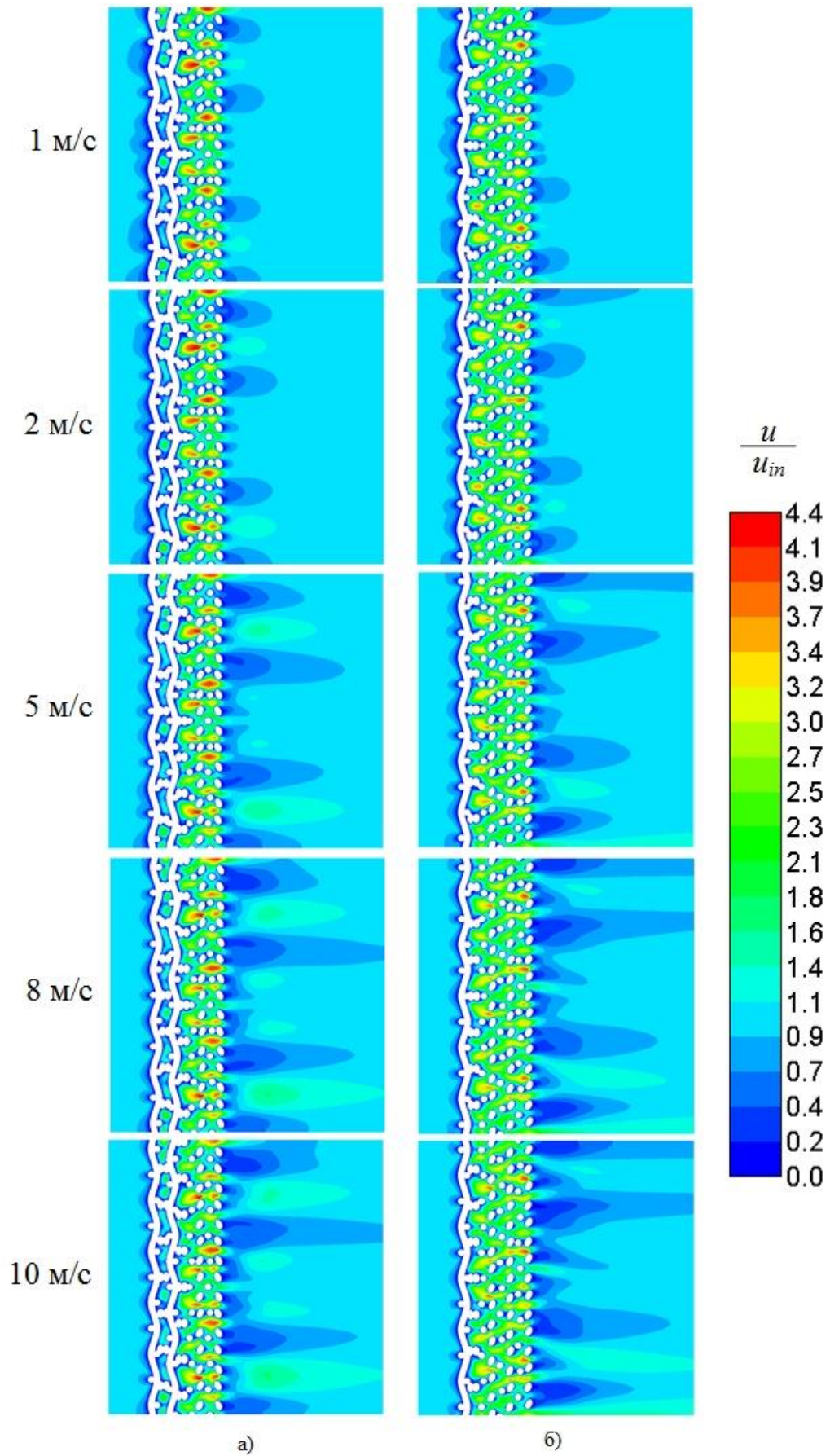


Рисунок 3.15 Распределение модуля скорости в области пористого тела в продольных сечениях расчетной модели для плоскости XY (а) и плоскости YZ (б)

В исследуемом диапазоне скоростей отчетливо видно воздействие потока на пористую вставку. С увеличением скорости возмущения сильнее «прижимаются» к поверхности скелета пористой вставки.

Отметим достоинство расчета на микроуровне, которое заключается в детализации картины течения внутри конструкции. Для иллюстрации этого, на рисунке 3.16 представлено векторное поле потока во фрагменте исследуемой пористой вставки, согласно которому видно, что исследуемая пористая вставка представляет собой развитую структуру сопряженных каналов, по которым поток проходит по пути наименьшего сопротивления, огибая проволоочки.

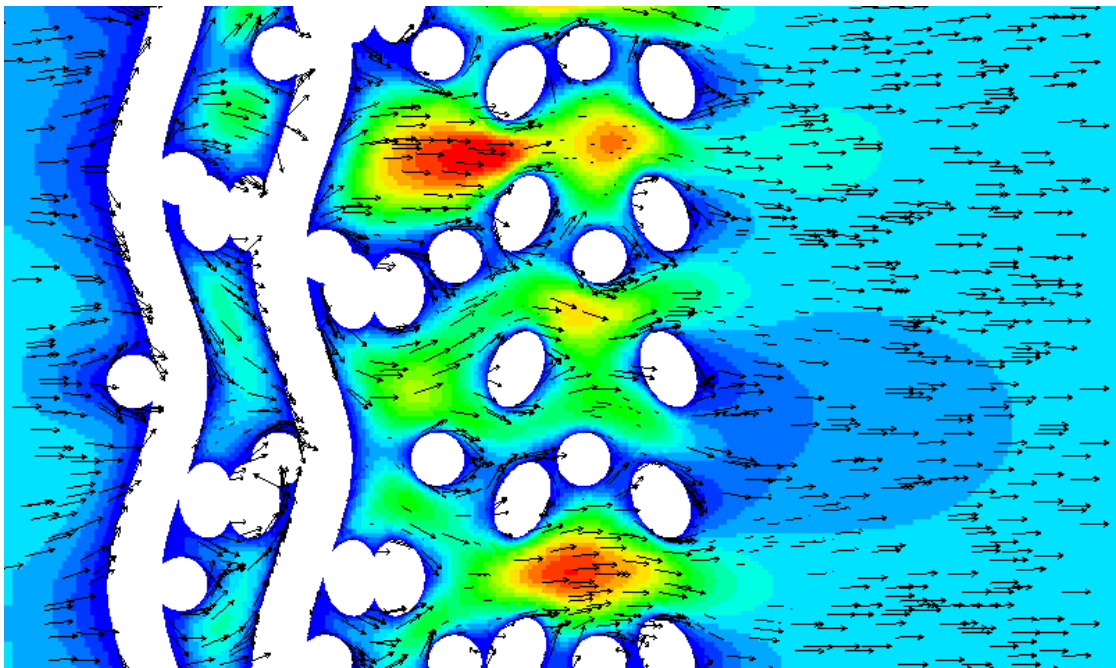


Рисунок 3.16 Векторное поле на фрагменте пористой вставки (расчет в Логос при н.у.)

Большой интерес представляет распределение скорости в поперечном сечении в области пористой вставки. На рисунках 3.17 и 3.18 представлены распределения маршевой и поперечных компонент вектора скорости для минимальной и максимальной начальной скорости потока исследуемого диапазона скоростей. На входном участке градиентные характеристики потока для минимальной начальной скорости выше, чем для максимальной начальной скорости, в то же время в выходном сечении градиентная картина более выражена для максимальной скорости. В сечении внутри пористой вставки характеристики почти одинаковы. Анализ картины течения в застойных зонах, образованных последними слоями пористой вставки, показал, что возникающие возмущения затухают на уровне трех калибров, а структура потока по своим характеристикам воспроизводит

структуру пористого материала.

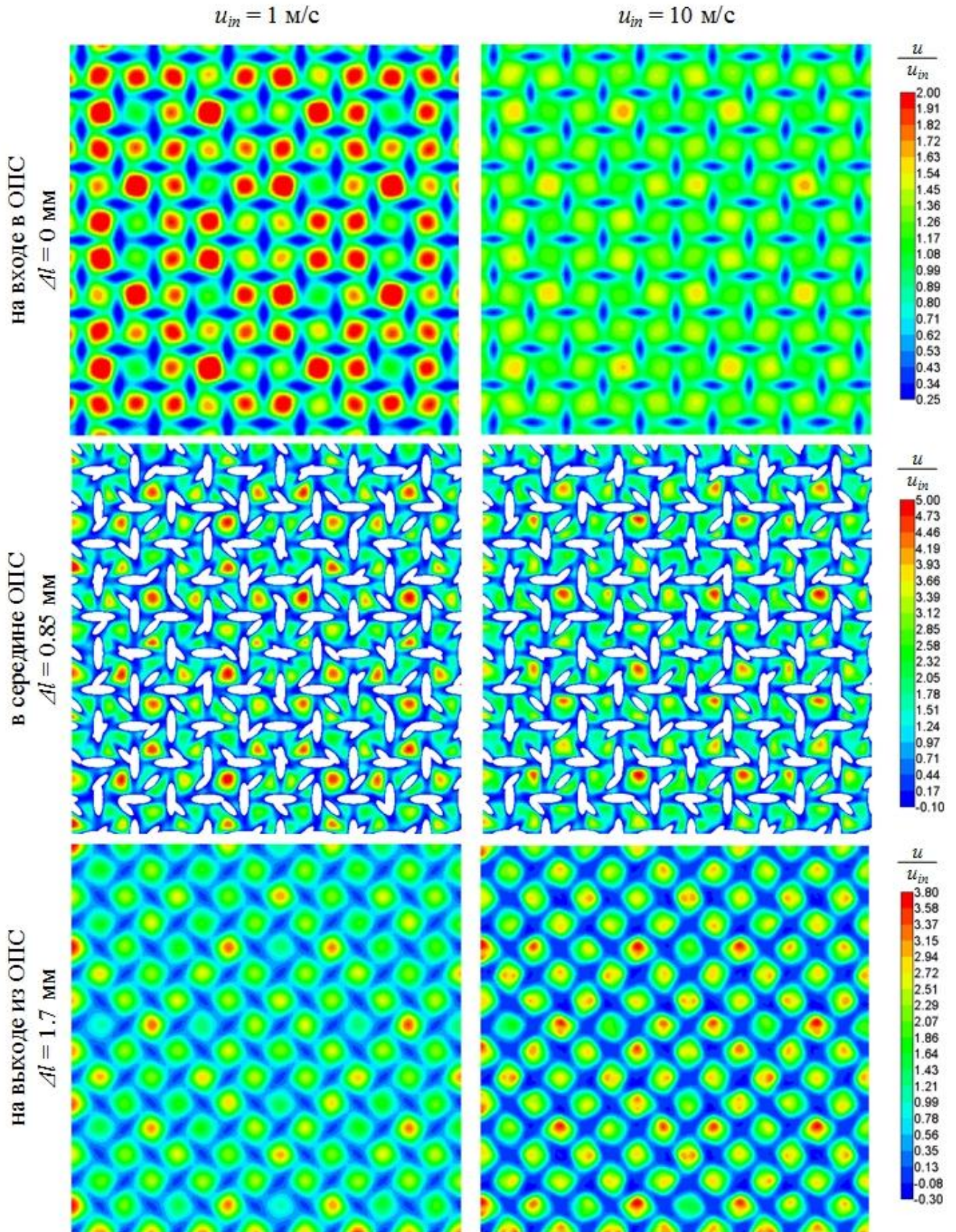


Рисунок 3.17 Распределение отношения маршевой компоненты скорости к начальной в поперечных плоскостях пористой вставки

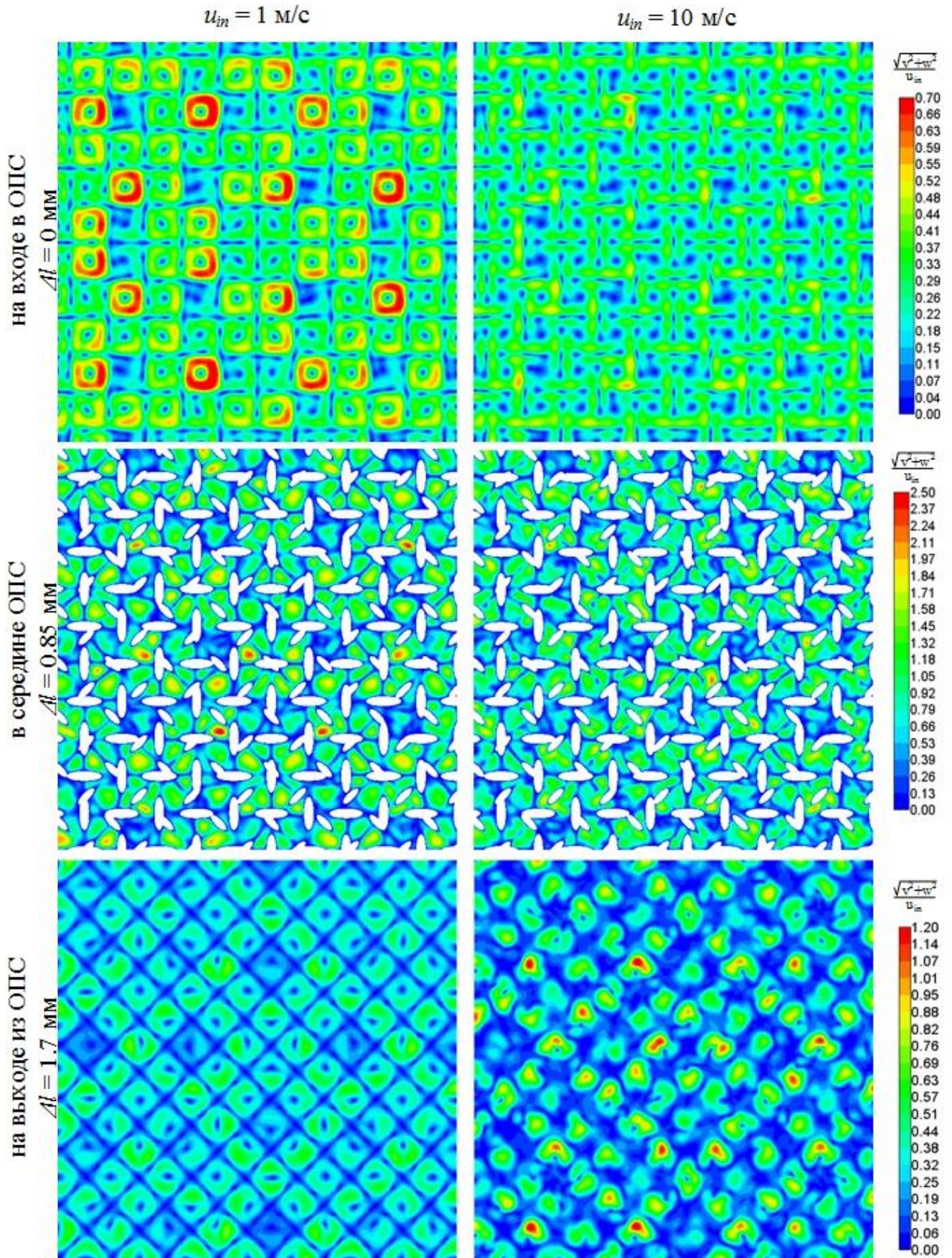


Рисунок 3.18 Распределение отношения поперечных компонент скорости к начальной в поперечных плоскостях пористой вставки

3.6 Численное моделирование спутного следа за пористой вставкой

Целью исследования спутного следа за пористой вставкой является определение расстояния, на котором затухают неоднородности, возникающие от пористой вставки.

Оценка такого рода проводилась на основе изменения максимального значения модуля скорости относительно средней скорости осредненному по площади значению в зависимости от расстояния, отсчитанного от конца пористой вставки – x . На рисунке 3.19 показаны графики зависимости максимального значения модуля скорости относительно средней скорости в сечениях по отношению к входной скорости.

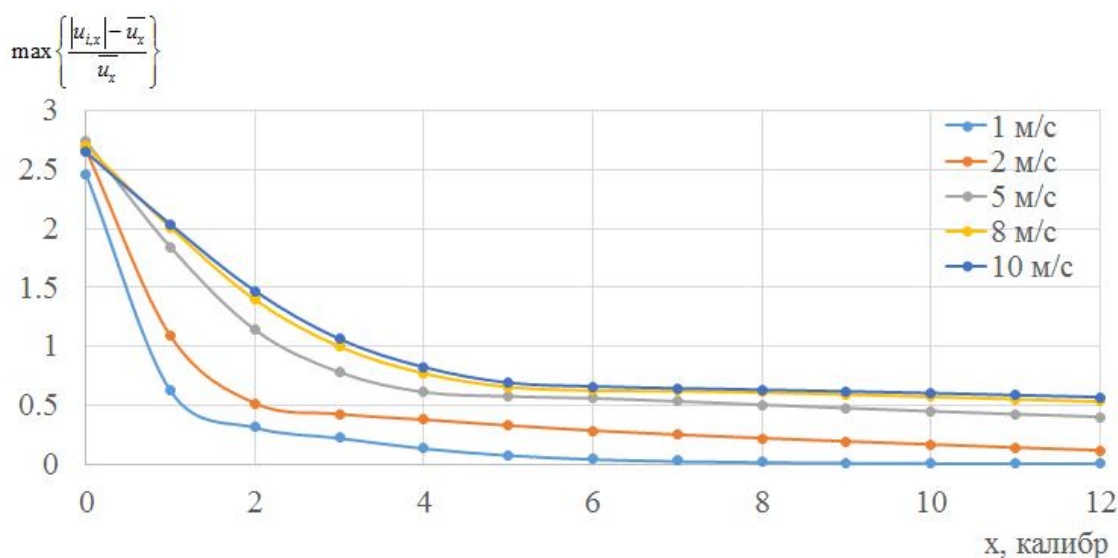


Рисунок 3.19 Расчетные зависимости изменения максимального значения модуля скорости относительно средней скорости в пространстве за открытопористой структурой

Данные графики показывают, что для исследуемого диапазона скорости сразу за ОПС максимальное значение отношения пульсаций к средней скорости находятся в диапазоне от 2.5 до 2.75. Т.е. данный вид ОПС в диапазоне скоростей от 1 до 10 м/с будет порождать перепад скорости близкий ~ 2.7 .

Значительный спад для всех вариантов наблюдается на первых 5 калибрах. Для малых скоростей (1 м/с и 2 м/с) изменение данной величины существенно снижается уже на первом калибре (более чем в 2 раза), для остальных скоростей наблюдается пологое изменение. Согласно приведенному графику, для скорости в 1 м/с начиная с 6 калибра поток становится однородным. Для остальных вариантов на расстоянии до 12 калибров сохраняется существенный градиент скорости.

Представленные зависимости на рис. 10 можно выразить следующим образом.

$$\max \left\{ \frac{|u_{i,x}| - \overline{u_x}}{u_x} \right\} = A - B \cdot C^x \quad (3.5)$$

где u_i – скорость потока в поперечном сечении. Коэффициенты A , B , C выражаются следующим образом:

$$A = 0.57 - 0.74 \cdot 0.69^u, \quad (3.6)$$

$$B = -2.27 - 0.17 \cdot u + 0.057 \cdot u^2 - 0.0065 \cdot u^3 + 2.53e-4 \cdot u^4, \quad (3.7)$$

$$C = 0.65 - 0.53 \cdot 0.72^u, \quad (3.8)$$

где u – начальная скорость потока.

Для варианта со скоростью 10 м/с был проведен расчет исследования спутного следа с 12 по 24 калибр за пористой вставкой. Существенных изменений в градиенте скорости не обнаружено, наблюдается картина монотонного спада, что и на в расчете с 5 по 12 калибр.

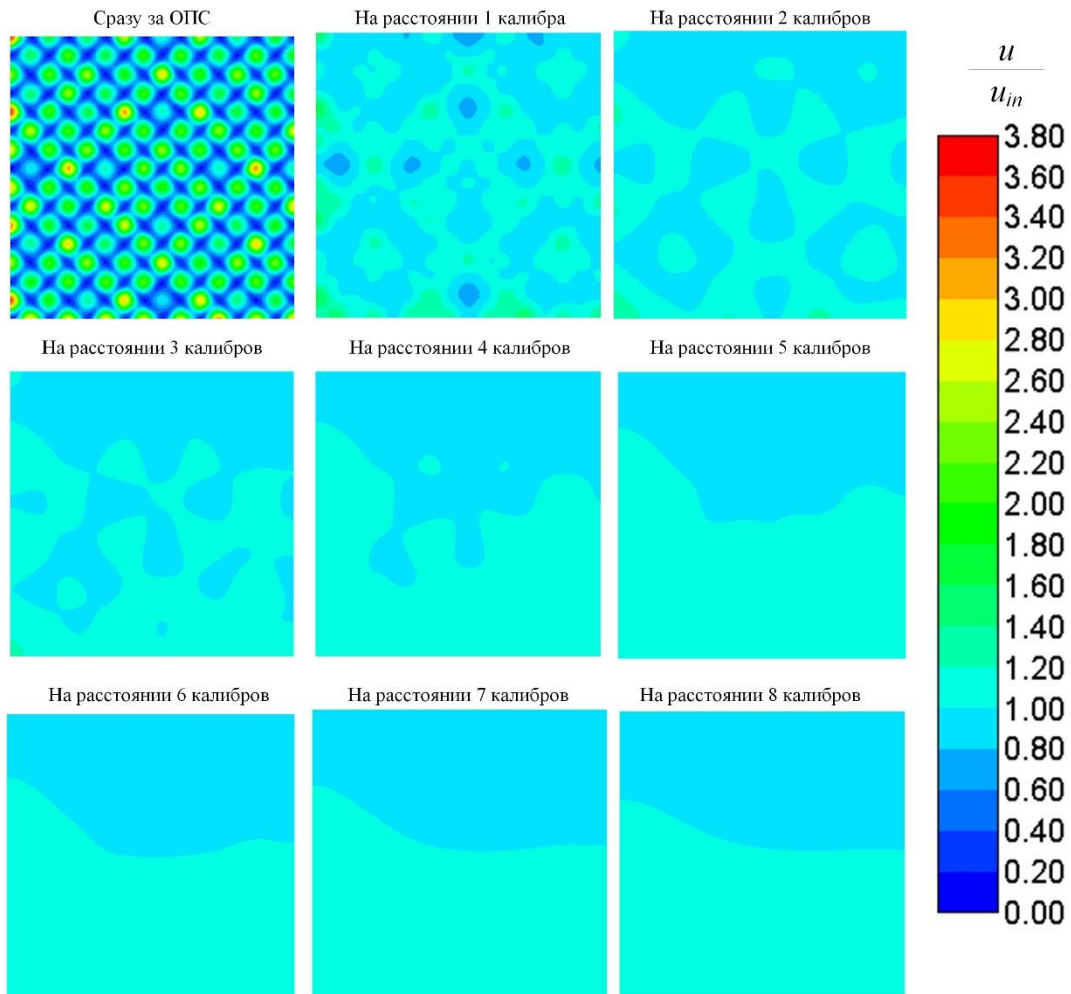


Рисунок 3.20 Распределение маршевой компоненты скорости в пространстве от ОПС при начальной скорости 1 м/с

На рисунках 3.20 и 3.21 продемонстрировано изменение отношения модуля скорости к начальной в поперечных сечениях модели, равноудаленных от задней границы ОПС. Из полученных результатов видно, что при начальной скорости 1 м/с возникающие в потоке пульсации за пористой вставкой затухают на уровне 5 калибров от ОПС. Для начальной скорости 10 м/с существенные изменения наблюдаются на уровне первых 5 калибров вниз по потоку, далее вниз по потоку изменение сохраняется в одном диапазоне значений отношения модуля скорости к начальной скорости потока.

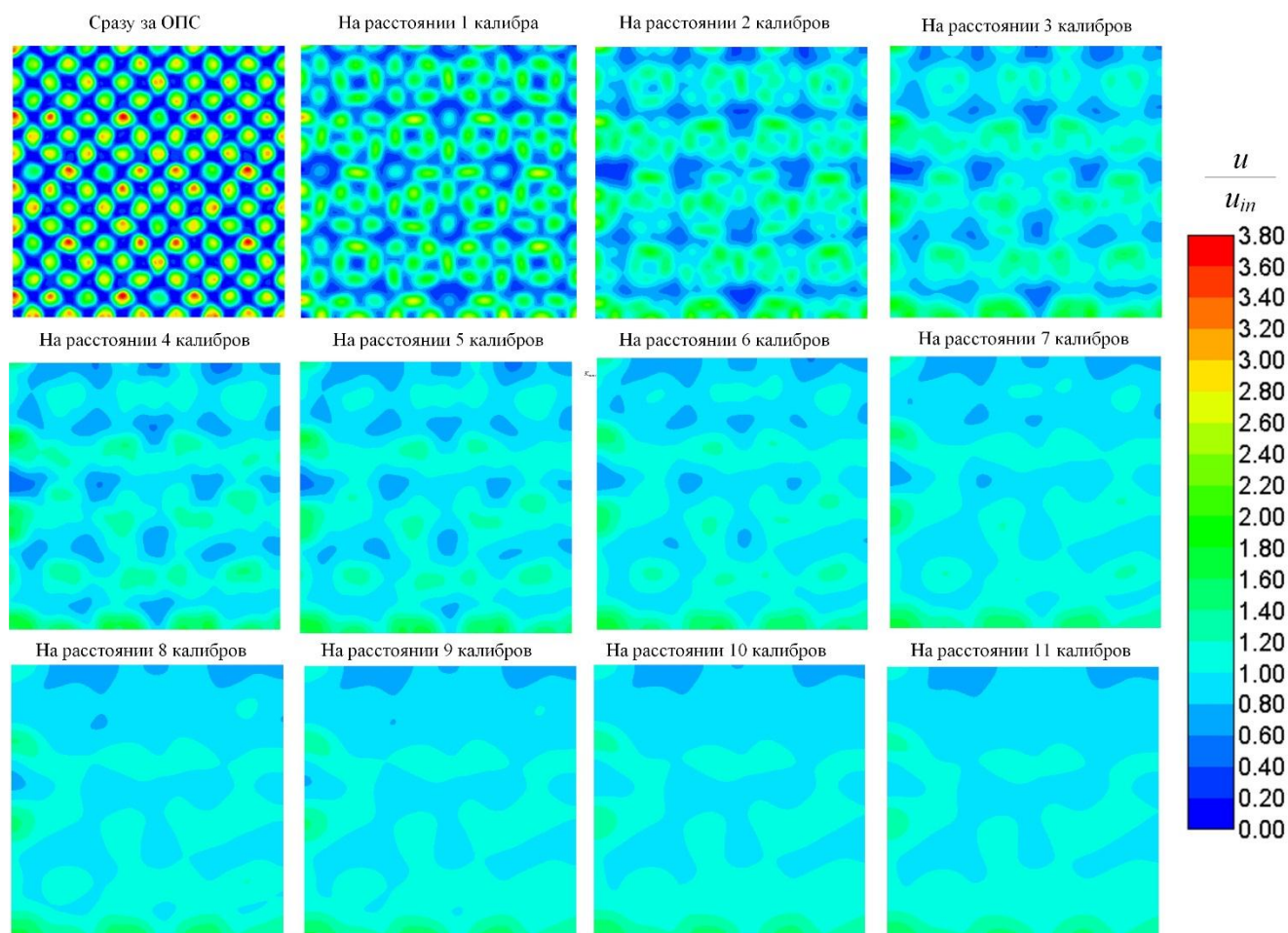


Рисунок 3.21 Распределение маршевой компоненты скорости в пространстве от ОПС при начальной скорости 10 м/с

Для потоков был проведен анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с помощью преобразования Фурье для двух пространственных переменных [136] по маршевой и поперечных компонент скорости. Для демонстрации приведены результаты для крайних значений скоростей исследуемого диапазона. На рисунках 3.22 и 3.23 представлены результаты АЧХ на различных расстояниях от ОПС при начальной скорости потока

1 м/с. Аналогичные оценки АЧХ на различных расстояниях от ОПС при начальной скорости потока 10 м/с представлены на рисунках 3.24 и 3.25. Анализ показал, что спектр неоднородности за пористой вставкой описывается низкочастотными характеристиками. Для исследуемого диапазона скоростей установлено, что на расстоянии одного калибра амплитуда частот существенно снижается.

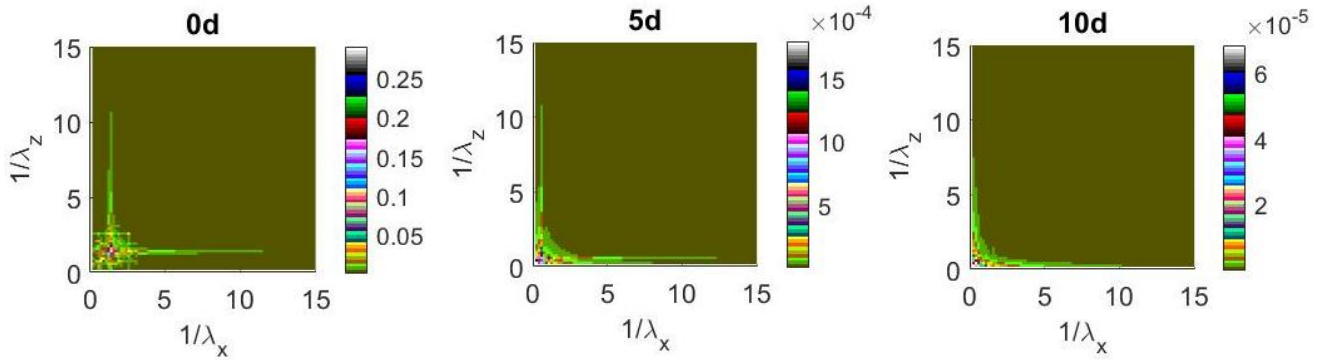


Рисунок 3.22 Спектр АЧХ для маршевой компоненты скорости на различных расстояниях за ОПС при начальной скорости 1 м/с

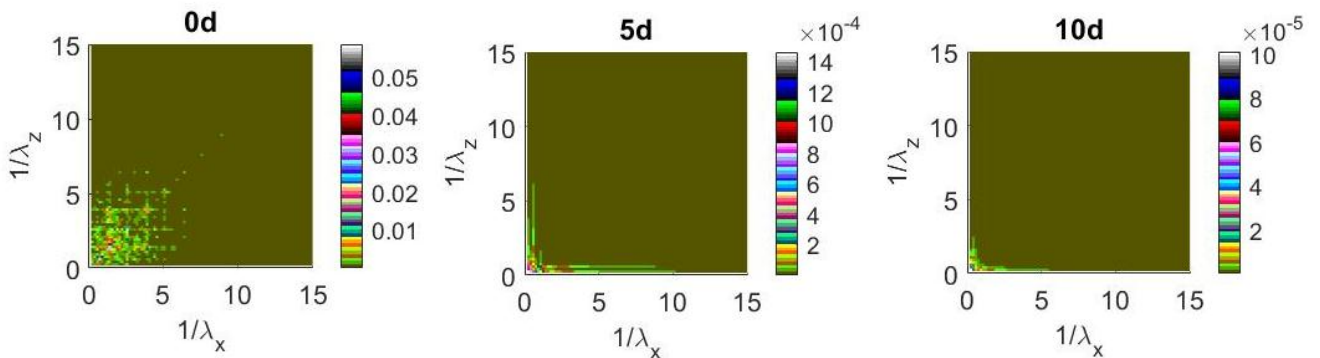


Рисунок 3.23 Спектр АЧХ для поперечных компонент скорости на различных расстояниях за ОПС при начальной скорости 1 м/с

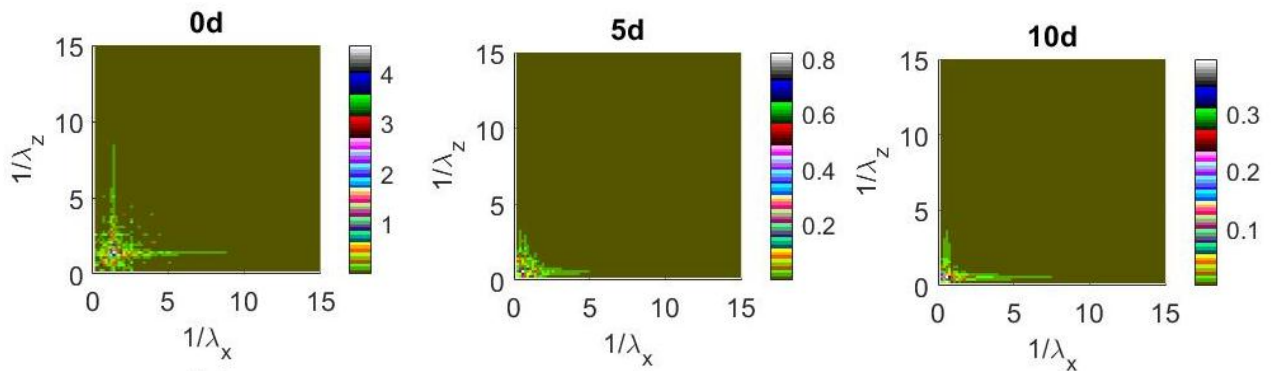


Рисунок 3.24 Спектр АЧХ для маршевой компоненты скорости на различных расстояниях за ОПС при начальной скорости 10 м/с

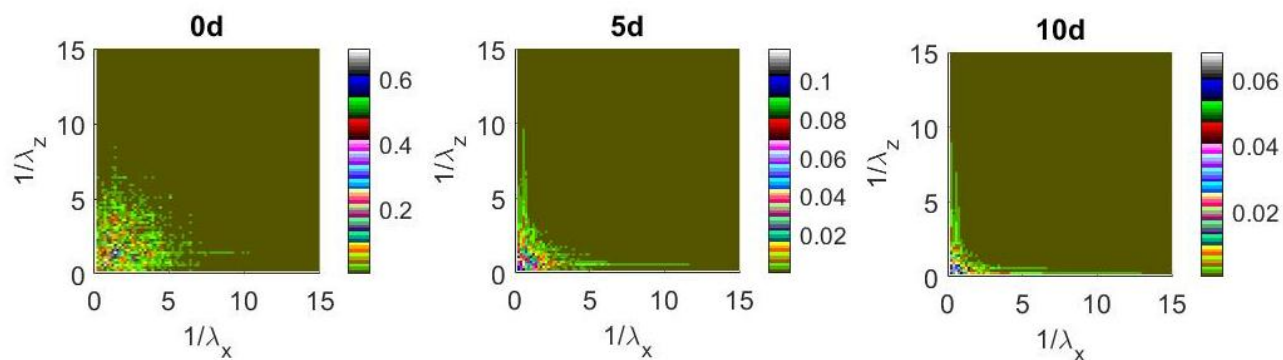


Рисунок 3.25 Спектр АЧХ для поперечных компонент скорости на различных расстояниях за ОПС при начальной скорости 10 м/с

Преимущество численного исследования структуры течения с использованием моделирования течения на микроуровне в поровом пространстве – наглядная демонстрация пульсаций, которые возникают за пористой вставкой и их влияние вниз по потоку. Полученные результаты расчета показывают, что пульсации, возникающие в потоке за счет пористой вставки, затухают на существенно малом расстоянии, т.е. при моделировании полномасштабных конструкций данным видом неоднородности можно пренебречь.

3.7 Численное моделирование структуры потока с пористой вставкой на макроуровне

В постановке микромасштаба было показано влияние структуры пористой вставки на характеристики однородного потока, т.е. что сама пористая вставка привнесла в поток. Использование пористой вставки создает в потоке дополнительное гидравлическое сопротивление, что может оказать существенное влияние на профиль скорости. В проведенных численных исследованиях было рассмотрено ламинарное течение, реальное же течение как правило носит турбулентный характер. Моделирование турбулентных течений в пористых вставках на микроуровне в полномасштабной постановке в настоящее время не представляется возможным. Поэтому такое моделирование проводится по макромоделям.

Для оценки влияния пористой вставки на неоднородный турбулентный поток целесообразно использовать моделирование в макромасштабе с использованием математических моделей описания пористого тела на основе фильтрационных моделей, в которых применяются осредненные показатели характеристик пористого тела. В связи с этим было проведено исследование влияния пористой вставки на структуру потока с использованием макромоделей.

В моделировании влияния пористой вставки на неоднородный поток использовалась геометрия цилиндрического канала, в которой отдельным регионом инициализирована пористая вставка с длиной региона вниз по потоку равной толщине пористой вставки из исследования на микроуровне ($\Delta l = 1.68$ мм) (см. рисунок 3.26). В качестве неоднородности потока использовался профиль скорости течения за коленом, рассмотренный в главе 2. Профиль получен на расстоянии $0.75d$ от поворота, имеет значительный градиент скорости, который оказывает существенное влияние на однородность потока на протяжении порядка 50 калибров трубы.

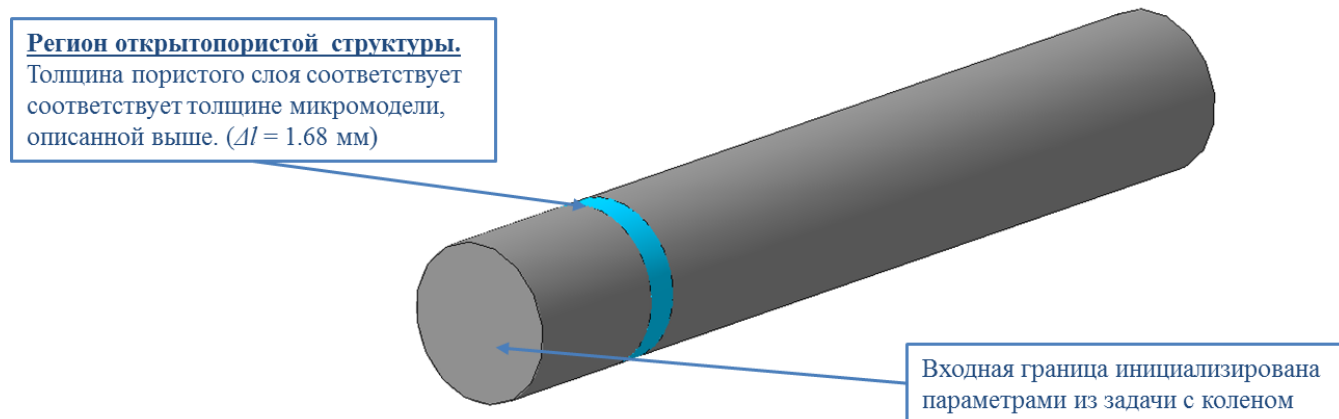


Рисунок 3.26 Геометрия расчета течения с пористой вставкой на основе модели Форхгеймера-Бринкмана

Для цилиндрического канала была построена блочно-структурированная сетка, с характерным масштабом ячейки 0,85 мм и количеством ячеек: $\sim 7 \cdot 10^6$. Численный расчет был проведен по модулю «Аэро-Гидро» комплекса «ЛОГОС» [27], в котором для моделирования в стационарной постановке турбулентных течений применялась двухпараметрическая модель турбулентности Ментера (SST). В данной трубе отдельным регионом учитывалась пористая вставка, в которой инициализировались инерционный и вязкостной коэффициенты, полученные из микроуровня по формуле 1.18.

На рисунке 3.27 представлена зависимость расчетного перепада давления от начальной скорости потока и аппроксимационная формула этой зависимости.

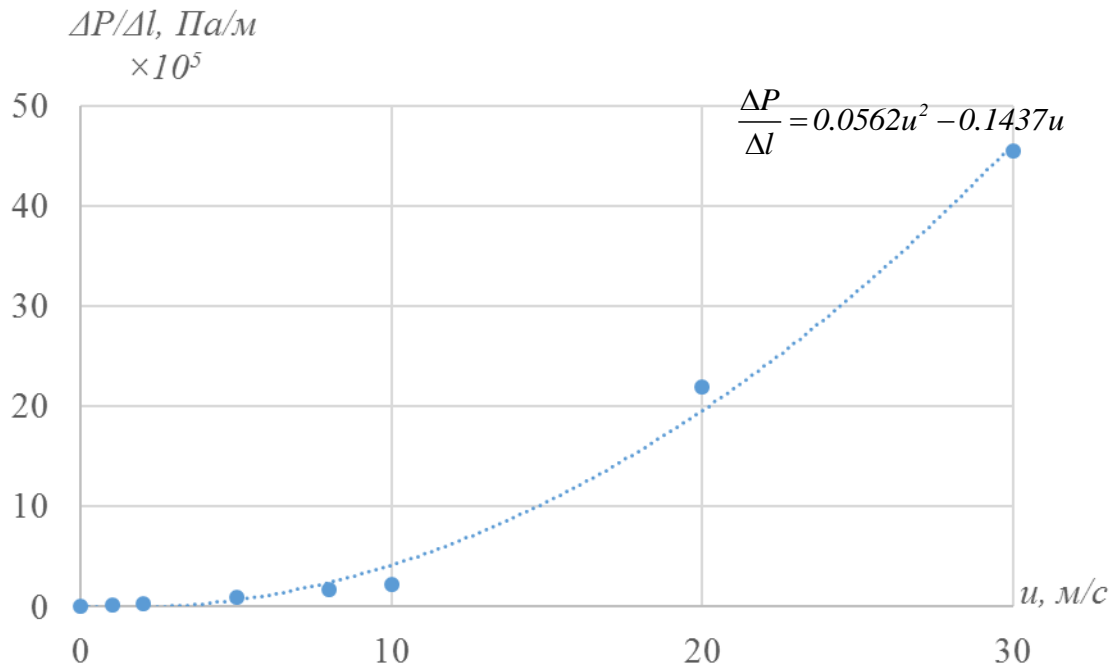


Рисунок 3.27 Зависимость перепада давления от входной скорости потока

На рисунке 3.27 точками указаны расчетные значения, которые были получены из моделирования течения через пористую вставку на микроуровне. Пунктирной линией отмечена аппроксимационная формула, которая соответствует формуле 1.18. В данной формуле коэффициенты $\tilde{A}(u) = 0.1437$, $\tilde{B}(u) = 0.0562$ найдены с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

На рисунке 3.28 представлено распределение отношения модуля скорости к начальной (K_{mass}), рассчитанного по формуле (2.4), в продольном сечении канала (а) и поперечном сечении на расстоянии от пористой вставки одного характерного диаметра трубы (б). Для сравнительного анализа на рисунке 3.28,в представлено распределение K_{mass} в поперечном сечении канала на аналогичном расстоянии без пористой вставки.

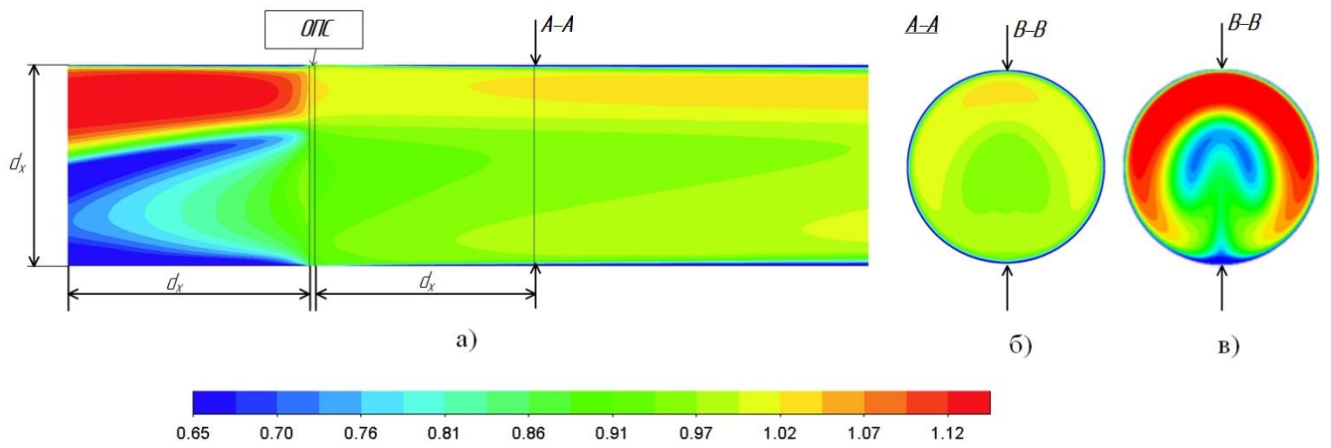


Рисунок 3.28 Распределение отношения модуля скорости к массовой скорости в продольном (а), поперечном сечениях канала с пористой вставкой (б) и без нее (в)

Из представленного на рисунке 3.28,а видно, что градиент скорости существенно снижается за открытопористой структурой. В поперечном сечении (рисунок 3.28, б) диапазон изменения K_{mass} составляет от 0.89 до 1.02, что существенно ниже чем диапазон изменения K_{mass} для модели без пористого региона. По сечению B-B, который проходит через ось симметрии, был построен график K_{mass} для моделей с пористым регионом и без него. График представлен на рисунке 3.29, согласно которому видно, что пористая вставка существенно выравнивает поток. Загибы графиков к значениям $-d_x/2$ и $d_x/2$ по оси абсцисс обусловлены наличием пограничного слоя.

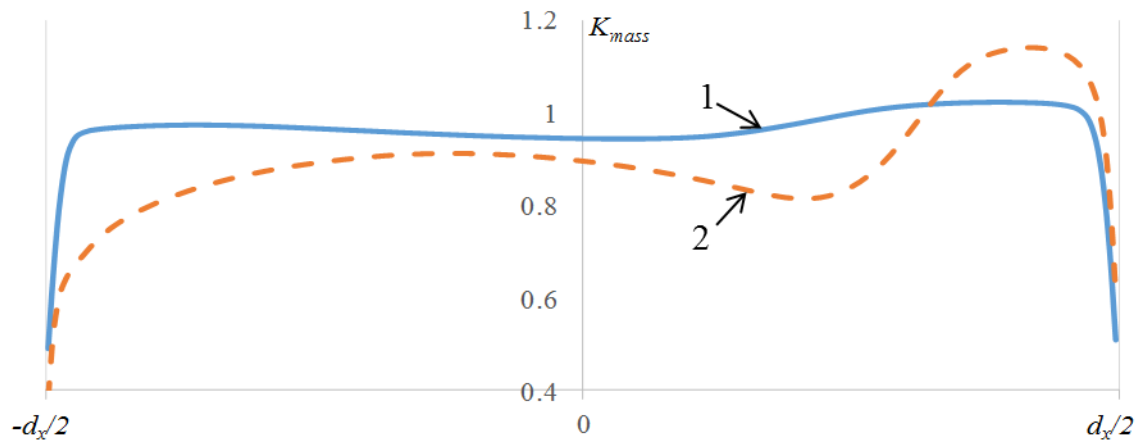


Рисунок 3.29 График распределения отношения модуля скорости к массовой скорости (K_{mass}) по оси симметрии (сечение B-B) для расчетов с пористым регионом (1) и без него (2)

Для оценки однородности потока необходимы количественные характеристики. В моделировании трехмерного турбулентного течения на основе модели турбулентности

используется величины завихренности и деформации, которые являются составляющими тензора градиента скорости. Для задач расчета внутренних течений предпочтительно использовать тензор завихренности, так как такой параметр наглядно показывает характер турбулентного потока [127].

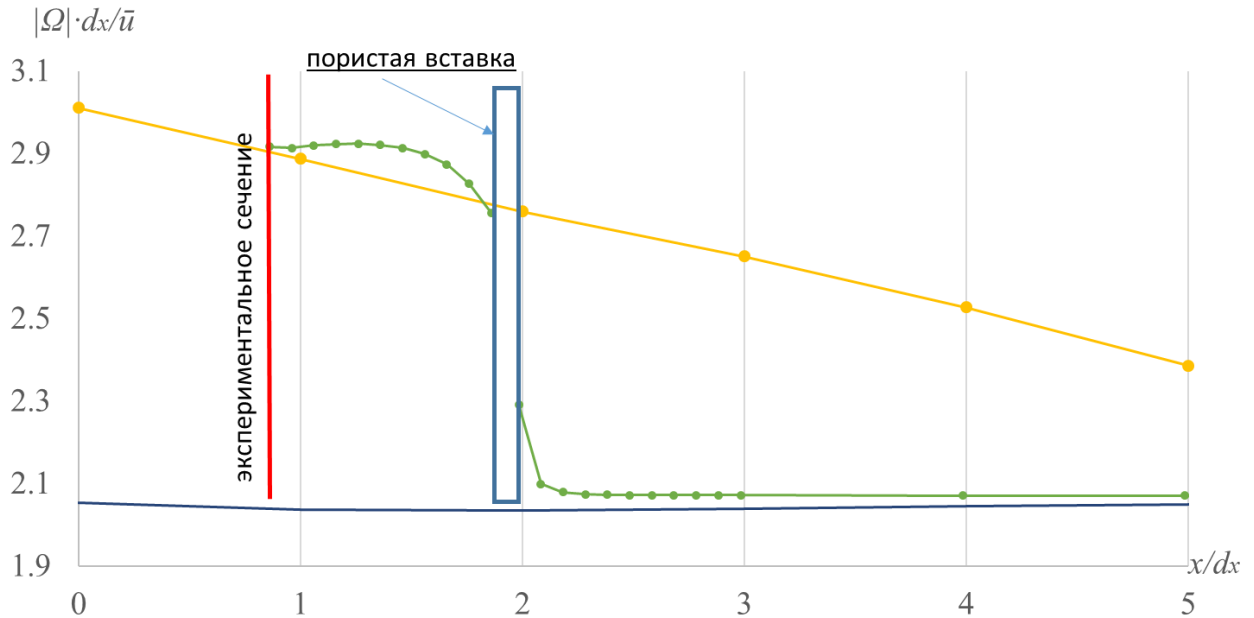


Рисунок 3.30 График распределения уровня завихренности вниз по потоку для расчетов трубы с неоднородным профилем скорости на входе с учетом ОПС (зеленый график) и без нее (желтый график), а также цилиндрической трубы с однородным потоком (синий график)

Согласно рисунку 2.26, порожденное поле завихренности для исследуемого профиля скорости в трубе сохраняется на расстоянии 20 калибров, но с применением пористой вставки наблюдается резкий спад уровня завихренности до значений, которые были получены в трубе того же диаметра с однородным профилем скорости (рисунок 3.30).

3.8 Исследование диффузионного перемешивания потоков на микроуровне в пористой вставке

В конструкциях двухпоточных газовых лазеров поток является многокомпонентным и формируется из активной среды и экранирующего потока. Активная среда состоит из частиц, участвующих в генерации мощности излучения, и инертного газа. Экранирующий поток содержит только инертный газ. Размер зоны перемешивания напрямую влияет

на качество излучения, поэтому важным свойством в формировании потока является диффузионное перемешивание и как на него повлияет пористая вставка. Попадая в область резонатора, потоки должны иметь минимальную зону перемешивания. Идеальным случаем является получение П-образного профиля распределения концентрации активных частиц вдоль оси генерации.

Теоретически и экспериментально определить эффективный коэффициент диффузии проблематично. Поэтому в рамках численного моделирования на микроуровне были поставлены расчеты по исследованию перемешивания двух потоков, целями которых было определить качественные и количественные характеристики взаимодействия потоков. Количественной характеристикой является эффективный коэффициент диффузии.

В исследовании диффузионного перемешивания использовалась та же модель пористой вставки, что и для исследования мелкомасштабных пульсаций, описанных в п. 3.4. Отличительной особенностью расчета является установка трассера на входной границе. Входной трассер пассивной примеси размещался в центре имел форму квадрата со стороной 0.375 мм. Моделирование проводилось для одного варианта скорости – 1 м/с с использованием функции «Пассивный скаляр» [28]. Уравнение переноса в этом случае записывается в следующем виде:

$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (3.5)$$

где u – скорость потока, ρ – плотность, D_ϕ – диффузионная вязкость.

Для турбулентных течений:

$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot \left(\left(D_\phi + \frac{\nu_t}{Sc} \right) \nabla \phi \right) + S_\phi \quad (3.6)$$

где μ_t – турбулентная вязкость, Sc – турбулентное число Шмидта.

На рисунке 3.31 показано трехмерное распределение пассивной примеси через пористую вставку.

Из рисунка видно, что процесс перемешивания в пористой вставке происходит интенсивнее. За счет сложной структуры каналов, на выходе из пористой вставки пассивная примесь имеет сложную хаотичную форму пятна.

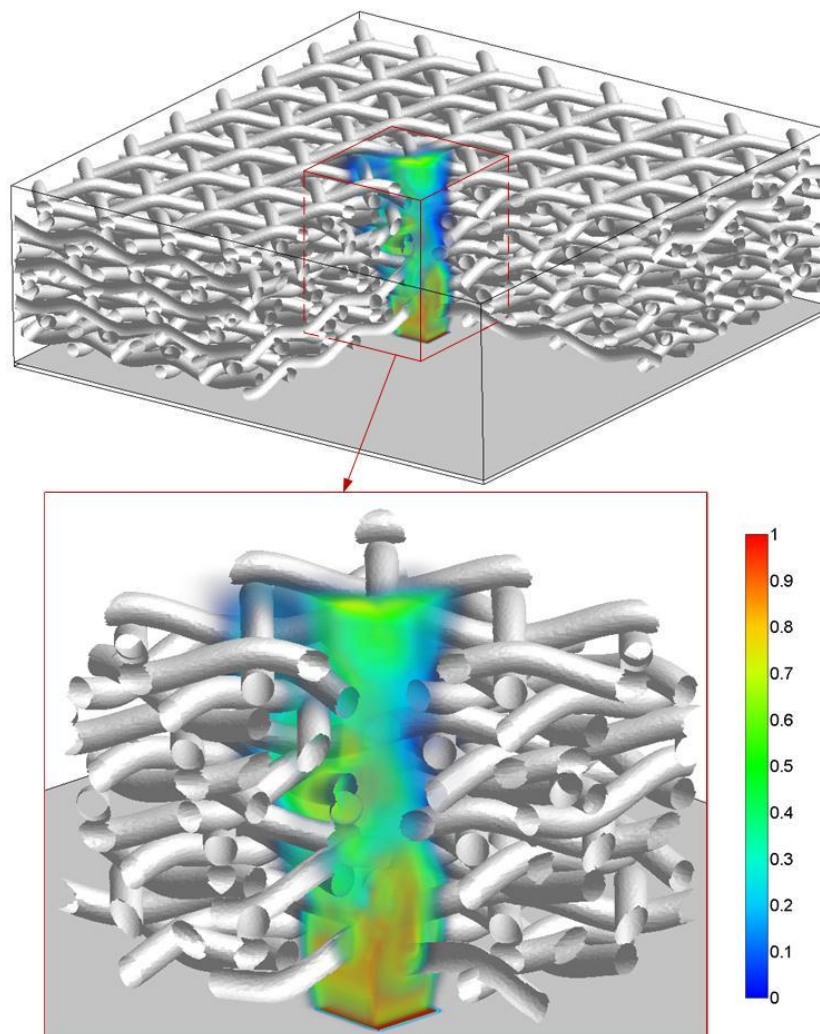


Рисунок 3.31 Трехмерное распределение пассивной примеси в области пористой вставки
в относительных единицах

Так как решалась стационарная задача, линии тока соответствуют траекториям движения частиц через пористую вставку. На рисунке 3.32 представлены траектории движения частиц пассивной примеси и поле концентрации пассивной примеси, которые характеризуют степень перемешивания. Рисунок 3.33 показывает траектории движения частиц из области инъекции в изометрической проекции. Из рисунков видно, что траектории имеют сложную разветвленную структуру. Первоначальная струя разветвляется, траектории огибают препятствия, при этом отдельные траектории пересекаются, но большие из них расходятся, занимая большую площадь.

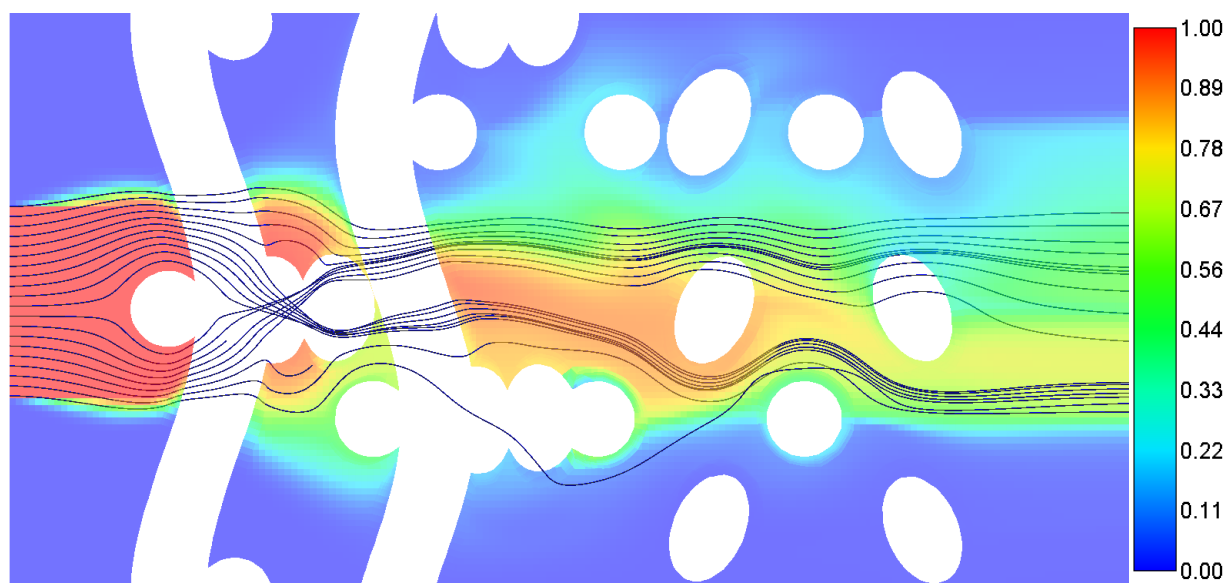


Рисунок 3.32 Фрагмент траекторий движения пассивной примеси на фоне распределения концентрации пассивной примеси

Согласно формуле (1.14) эффективный коэффициент диффузии зависит от извилистости. Для анализа величины извилистости в модели из каждой ячейки области трассера были построены траектории движения через пористую вставку. По формуле (1.9) была рассчитана извилистость для каждой траектории. Осредненный показатель

извилистости составил 1.0629. Согласно формуле (1.13) $\frac{D_{eff}}{D}$ составил 0,66.

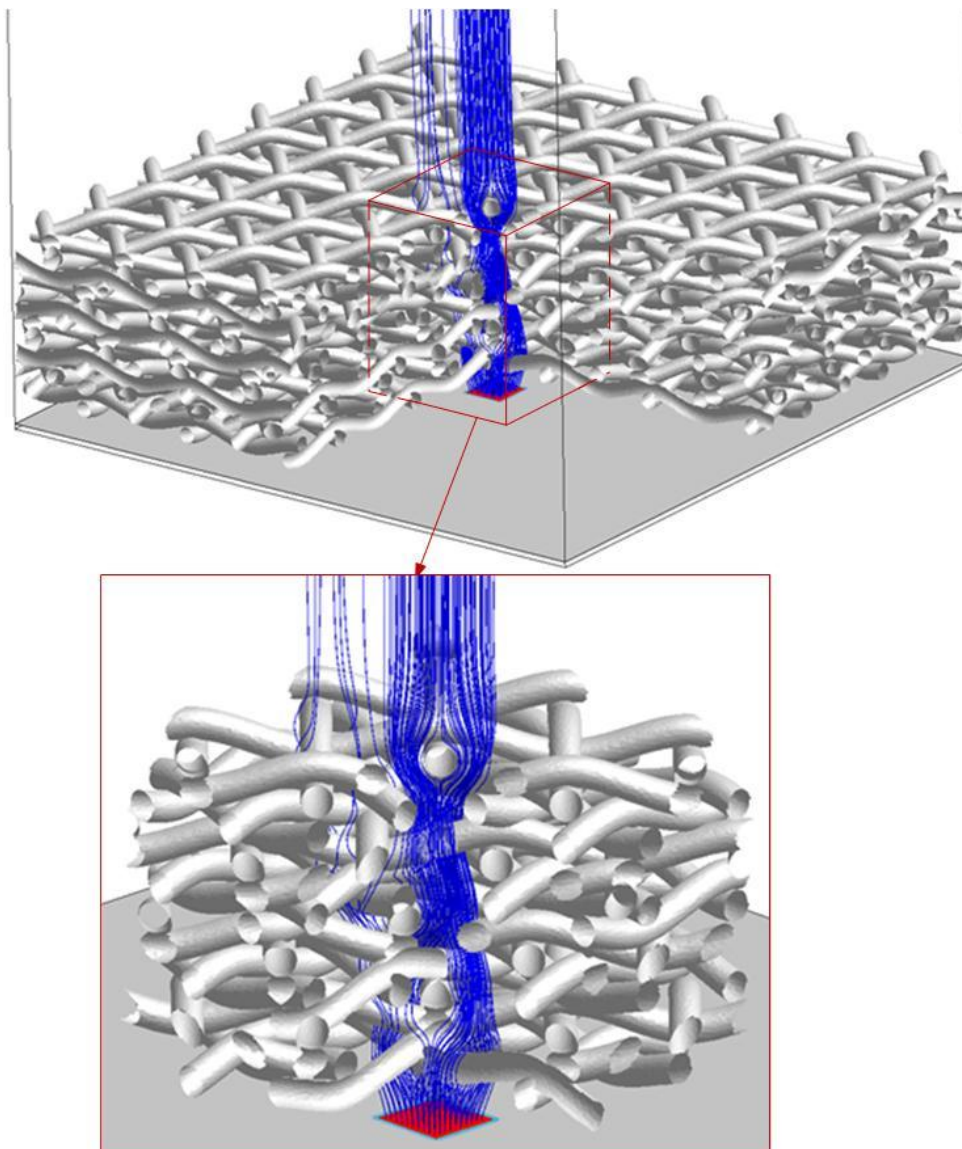


Рисунок 3.33 Траектории движения пассивной примеси через пористую вставку

Интересно посмотреть на перспективу размытия потока на больших толщинах пористой вставки. Для исследования была выбрана пористая вставка толщиной 2 см, которая состоит из 80 слоев сетки. Единая модель такого рода при идентичных габаритных размерах в поперечном сечении (6×6 мм) и сеточным разрешением (12,5 мкм) составила бы более полумиллиарда ячеек. Так как компоновка структуры модели из 8 слоев включает оптимально возможные укладки сетки, то в реальной модели было решено провести поэтапное исследование на фрагменте (рисунок 3.10) с последующим переносом выходных данных из предыдущего расчета на входную границу последующего. Таким образом, модель была разбита на 10 расчетов с толщиной пористой вставки ~ 2 мм. Визуально модель представляется таким образом (рисунок 3.34).

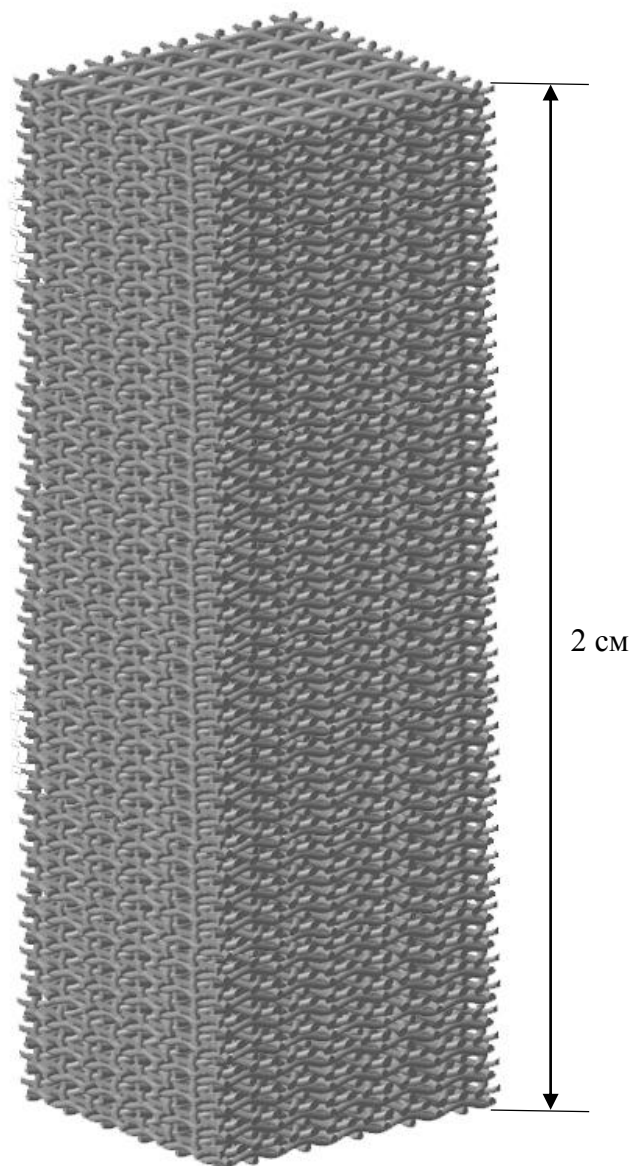


Рисунок 3.34 Совокупная модель пористой вставки, состоящая из 80 слоев сетки

Проверочным параметром возможности использования данного метода проведения расчета стал перепад давления, который реализуется на пористой вставке. На рисунке 3.35 представлен график зависимости ΔP от толщины ОПС. Синим графиком отмечено изменение давления на дробном счете, красным изменение, рассчитанное на макро-модели с использованием описания пористого тела по модели Форхгеймера-Бринкмана. Из графика видно, что реализуемый перепад давления имеют практически идентичны значения в обоих расчетах.

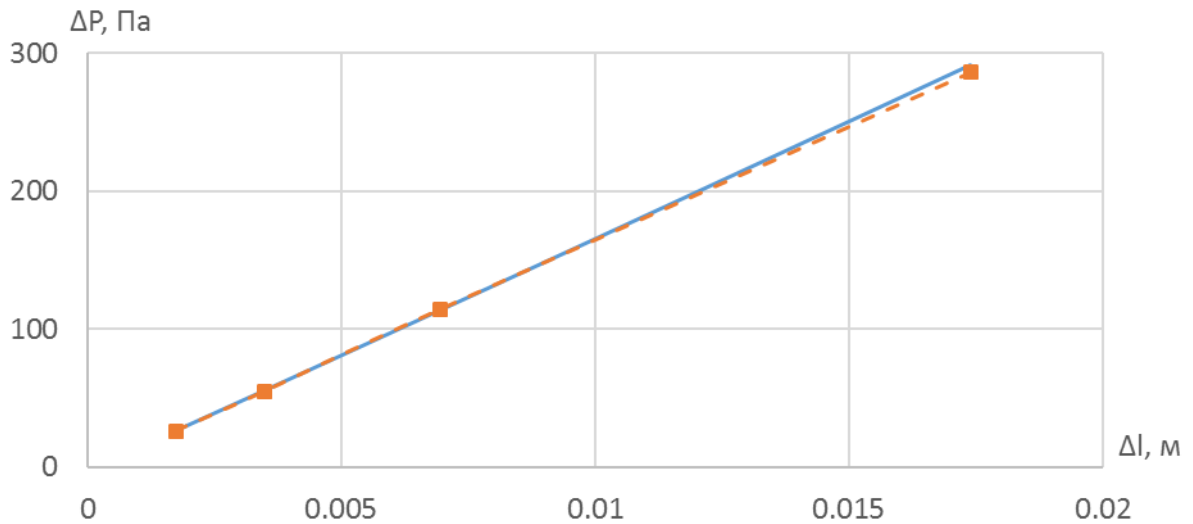


Рисунок 3.35 График изменения давления от толщины пористого тела

На рисунке 3.36 представлен совокупный рисунок прохождения пассивной примеси через все слои. Масштаб отображения концентрации был подобран таким образом, чтобы увидеть на сколько размывается пятно в продольном сечении.

На рисунке 3.37 представлено изменение формы пассивной примеси в зависимости от уровня толщины ОПС. Таким образом после 2 см ОПС максимальная концентрация составила $\sim 7\%$ и пятно увеличилось в размерах более чем в 5 раз. Из представленных результатов можно сделать вывод, что поток, проходя через пористую вставку приобретает хаотичную форму и с увеличением количества слоев сетки в пористой вставке происходит его смещение, то есть центр струи смещается. Это говорит о том, что диффузия в пористой вставке имеет анизотропный характер, который определяется структурой пористой вставки, и должен определяться тензором коэффициента диффузии. Однако учесть эту анизотропию весьма проблематично для рассматриваемой геометрии пористой вставки.

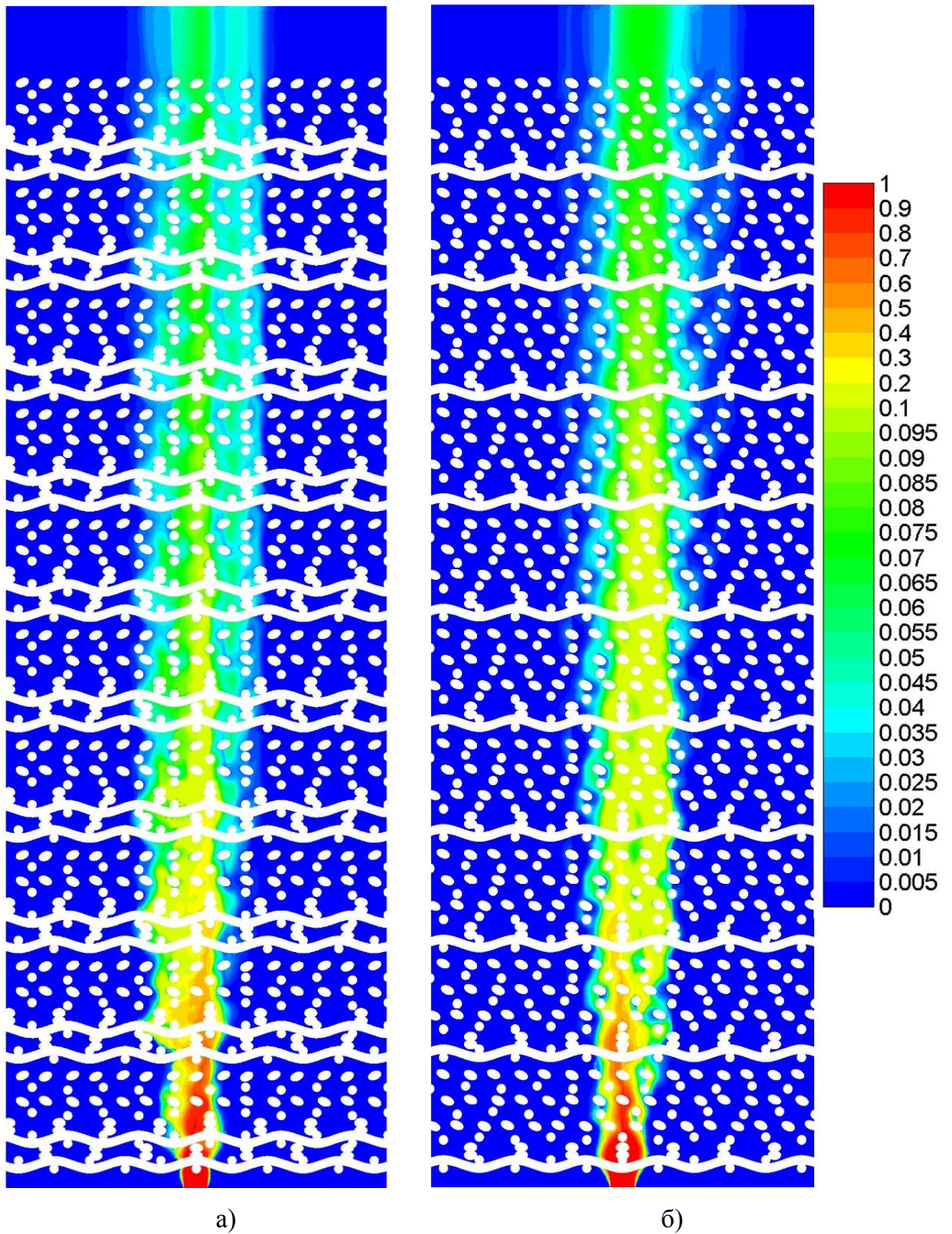


Рисунок 3.36 Распространение концентрации вещества в пористом теле в продольных сечениях расчетной модели для плоскости XY (а) и плоскости YZ (б)

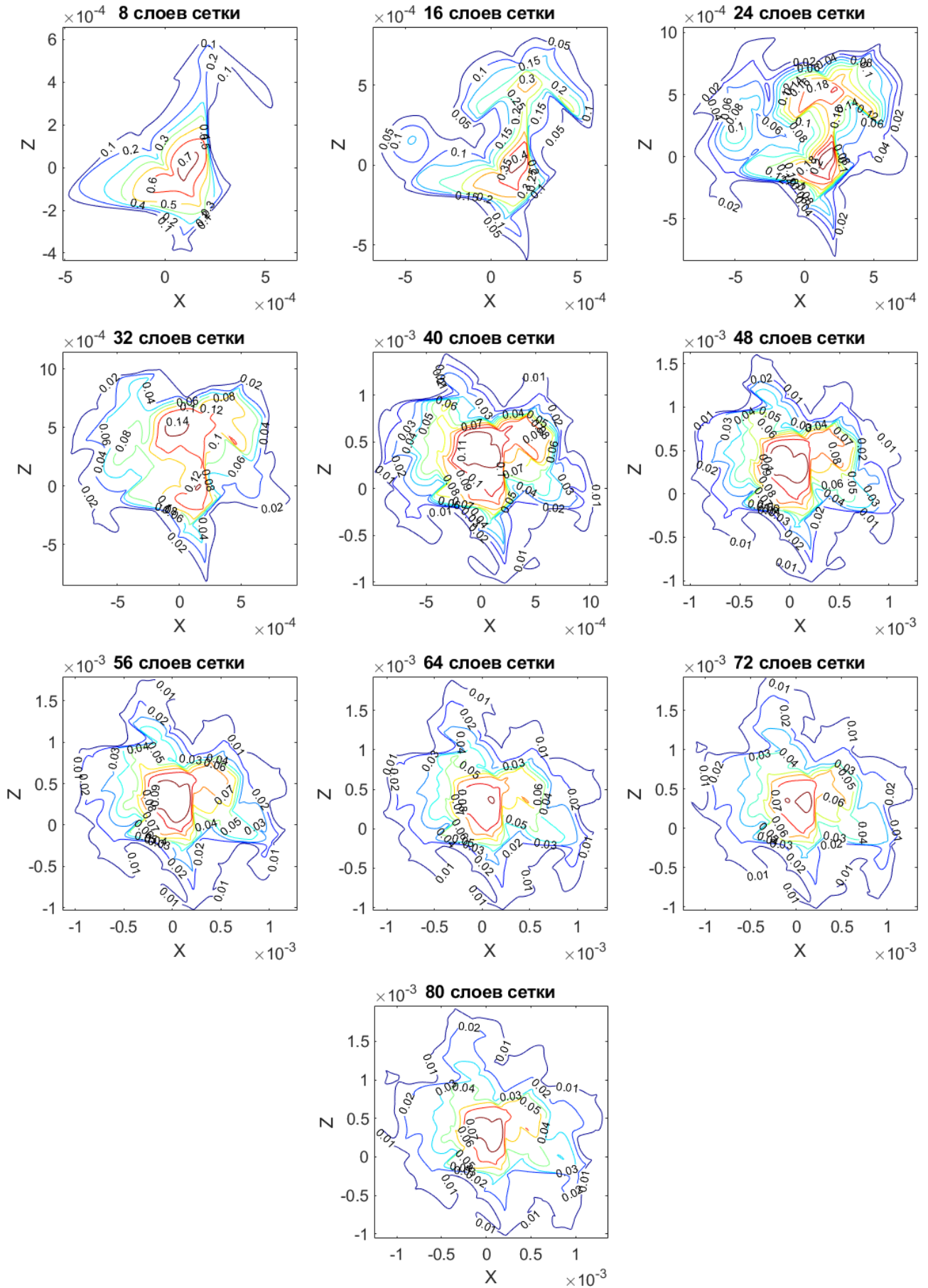


Рисунок 3.37 Изолинии пассивной примеси в поперечном сечении за решеткой для разных толщин ОПС

Наличие пористой вставки приводит к более интенсивному перемешиванию потоков. Это интенсивное перемешивание можно учесть в уравнении переноса концентрации за счет введения эффективного коэффициента диффузии [137]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \bar{u} C = \nabla (D_{eff} \nabla C) \quad (3.5)$$

где D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии, C – доля пассивной примеси, u – скорость потока.

Эффективный коэффициент диффузии можно определить по формуле:

$$D_{eff} = \frac{\left(\int u C ds \right)_{x=L} - \left(\int u C ds \right)_{x=0}}{\Delta l} \approx k_{eff} \frac{\nu}{Sc} \quad (3.6)$$

где Δl – толщина пористой вставки, Sc – число Шмидта, ν – кинематическая вязкость, k_{eff} – эффективный коэффициент.

Для проверки вычисленного D_{eff} были поставлены расчеты течения в пористой вставке на макроуровне, где пористая вставка описывается отдельным регионом, в котором задается рассчитанный коэффициент диффузии. Было поставлено 4 расчета с разными толщинами пористой вставки Δl , $2\Delta l$, $4\Delta l$ и $10\Delta l$.

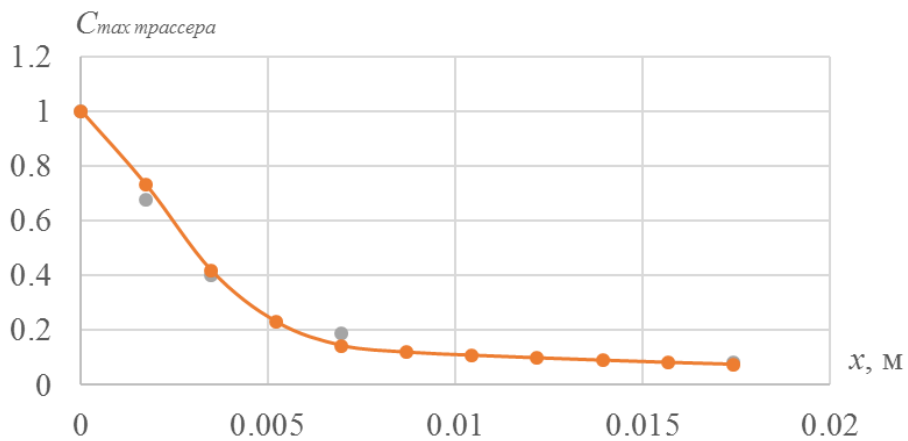


Рисунок 3.38 График максимальной концентрации трассера после прохождения пористой вставки в расчетах на микроуровне (оранжевый) и макроуровне (серый)

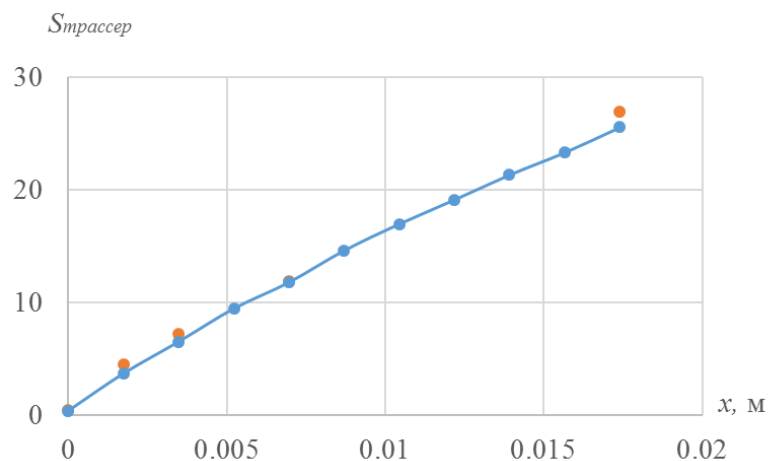


Рисунок 3.39 График изменения площади трассера после прохождения пористой вставки в расчетах на микроуровне (синий) и макроуровне (оранжевый)

На рисунках 3.38 и 3.39 показаны графики изменения показателей трассера в расчетах макро и микромасштабах. Установление соответствия профиля рассеивания пассивной примеси проводилось по максимальной концентрации в данном сечении и площади, занимаемой пассивной примесью (рисунок 3.38). График показывает, что изменение концентрации пассивной примеси имеет экспоненциальную зависимость. В то время как график изменения площади пассивной примеси носит линейный характер (рисунок 3.39). Установлены соответствия графиков макро и микромасштабов, что указывает на достоверность.

3.9 Выводы по третьей главе

1. Разработана технология построения сеточной модели пористой вставки типа ПСМ для расчета на микроуровне с использованием САД пакетов. Проведен анализ неоднородности образцов с открытопористой структурой из спрессованных слоев стандартного сетчатого материала (ПСМ) с разными типами компоновки и одинаковой пористостью $\Pi = 0,7$. Предложенный способ построения сеточной модели пористой структуры позволяет численно моделировать открытопористые структуры и использовать их результаты в перспективных проектах.

2. Численно исследована структура потоков в пористой вставке на микроуровне, на основе которой получены оценки неоднородности, вносимые пористой вставкой, а также вязкостные и инерционные коэффициенты для описания течения в пористой вставке на макроуровне с помощью модели Бринкмана-Форхгеймера.

3. Получена оценка спутного следа на микроуровне, которая показывает, что возмущения, возникающие в потоке, имеют низкочастотные характеристики и затухают на расстояниях порядка 6 калибров.

4. На основе моделирования течения в канале с пористой вставкой на макроуровне получено, что уровень завихренности для исследуемого профиля за коленом с использованием пористой вставки резко снижается до уровня однородного потока на расстоянии одного диаметра трубы за пористой вставкой.

5. Численно исследовано перемешивание потоков в пористой вставке, из анализа которого установлено, что пористая вставка интенсивно влияет на перемешивание потоков. Пятно пассивной примеси за пористой вставкой имеет стохастический характер, за счет разветвленной структуры каналов в пористой вставке поток приобретает анизотропный характер. Получен эффективный коэффициент диффузии для данного образца.

Глава 4 Расчетная технология полномасштабного моделирования течения в тракте проточного лазера с пористыми вставками

4.1 Введение

Во второй главе были рассмотрены подходы к исследованию возмущений потока на примере поворота на угол 90 градусов. В данной главе приводятся результаты исследования конструкции теплообменника проточного газодинамического лазера, который состоит из трубы цилиндрической формы, колена постоянного сечения и блока диффузор-конфузор. Описанный во второй главе характерный элемент конструкции, а именно поворот на угол 90 градусов, является частью узловой системы рассматриваемой в данной главе. В связи с этим используются те же подходы, которые были использованы во второй главе. Рассмотрены RANS подход, а также вихреразрешающий подход на основе зонного RANS-LES перехода в нестационарной постановке. Особенность данного раздела является установление согласования подхода численного моделирования для разных чисел Рейнольдса с экспериментальными данными, с последующим численным анализом течения на экспериментально труднодоступных участках конструкции. Экспериментальные данные для расчета также были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. П.Е. Алексеева [30].

4.2 Описание расчетной технологии

Рассмотренные в предыдущих главах вопросы затрагивают отдельные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики при проектировании проточного контура газодинамического лазера. В реальной жизни все эти проблемы идут в совокупности, поэтому при проведении численного моделирования конструкции крайне важно максимально учесть всевозможные особенности. Обращаясь к схеме проточного контура газодинамического лазера, показанного на рисунке 1.1, были рассмотрены отдельные части: криволинейный канал и пористая вставка. Таким образом, следующим этапом исследования является проверка достоверности совокупности модульных решений моделирования системы типовых конструкций системы, а также проверка рабочего диапазона скоростей потоков.

По исследованию структуры течения в криволинейном канале с использованием

RANS и вихреразрешающего (зонного RANS-LES) подходов с построением соответствующих сеточных моделей и вариации входных параметров моделирования показано, что применяемые численные подходы качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными. За коленом формируется вторичное течение, которое существенно влияет на структуру потока. В связи с этим газодинамические характеристики существенным образом зависят от описания турбулентных вихревых структур, поэтому крайне важно в этих областях ее адекватно описать. Наиболее близкие результаты показывает методика моделирования турбулентных течений на основе вихреразрешающей модели турбулентности. Недостатком данного подхода являются большие затраты вычислительных ресурсов на подобный расчет. В то время как RANS постановка показывает осредненную картину течения с минимальными ресурсными затратами.

В RANS подходе наиболее оптимальным решением является использование двухпараметрической модели турбулентности Ментера (SST) с соответствующей сеточной моделью, которая отвечает всем заявленным требованиям расчета. В расчете присутствует неопределенность структуры потока, формируемая в реальной конструкции компрессором, в связи с этим были подобраны газодинамические и турбулентные параметры потока.

В вихреразрешающем подходе использовался зонный RANS-LES метод счета, согласно которому модель делится на две части с заданными границами RANS и LES областями при этом на входе в LES область создается «искусственная» турбулентность (флуктуаций скорости). Сеточная модель адаптирована под условия расчета, а именно выполнено зонирование по области разделения перехода от RANS в LES.

Показана применимость пористых вставок с целью выравнивания неоднородного профиля скорости на микро и макроуровне. В ходе решения задачи на микроуровне установлена квадратичная зависимость перепада давления для рассмотренной в гл.3 пористой вставки, которая описывается двумя коэффициентами – вязкостным и инерционным, а также показано, что возмущения от самой пористой вставки носят низкочастотный характер и очень быстро затухают, поэтому при описании в макромасштабе, данными возмущениями можно пренебречь. Полученные коэффициенты сопротивления пористой вставки на микроуровне для модели Форхгеймера-Бринкмана апробированы в расчетах по макро моделированию структуры течения в канале с пористой вставкой, для которой имеется экспериментальная информация.

4.3 Применение расчетной технологии для описания течения в конструкции теплообменника

4.3.1 Постановка задачи

Одной из задач при конструировании газодинамического лазера с замкнутым циклом является утилизация тепла, который образуется в результате лазерной генерации и потери части веса кванта накачки в этом процессе. Для эффективного отвода тепла и увеличения теплообмена применяется специальная конструкция, в которых увеличивается поверхностная площадь канала. Отметим, что утилизации тепла посвящены специальные исследования [138-140]. Вопрос об эффективном отводе тепла в данной работе детально не рассматривается.

Для апробирования расчетной технологии рассматривается модель конструкции части проточного контура газодинамического лазера, которая состоит из основных элементов конструкции: входной трубы диаметром $d = 73$ мм длиной 20 диаметров, поворота на угол 90 градусов с постоянным сечением и блока диффузор – цилиндрическая труба – конфузор и выходной частью трубы длиной ~ 6 диаметров. Эскиз рабочей конструкции с габаритными размерами представлен на рисунке 4.1.

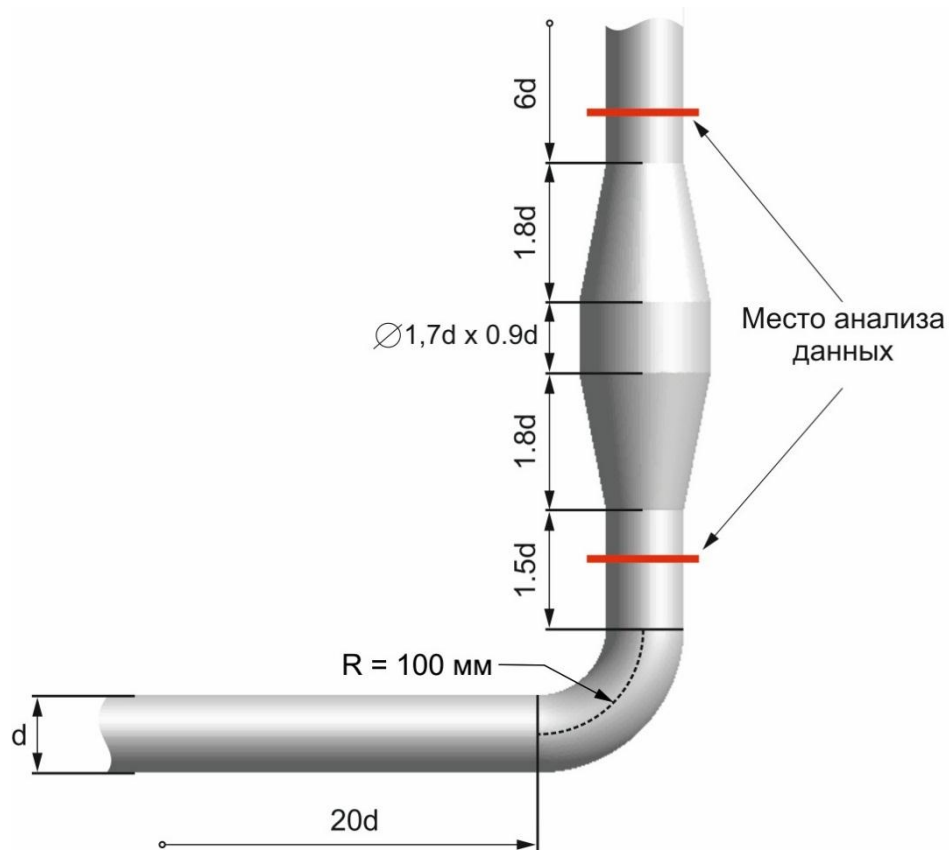


Рисунок 4.1 Схема исследуемой конструкции

Данная геометрия соответствует экспериментальной конструкции аэродинамического стенда ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [30], на котором для проверки расчетной технологии описания течения в газодинамическом тракте лазера были проведены экспериментальные исследования.

Подробно методика экспериментального исследования описана в [СВЗ]. Измерение локальных значений скорости проводились с помощью пневмометрического зонда Пито-Прандтля и подключенного к нему преобразователя дифференциального давления. Зонд имел диаметр чувствительной части 3 мм и был заранее тарирован с помощью эталонного источника потока.

Технические характеристики экспериментальных измерений на стенде ФТ-18:

- рабочий диапазон 0.2-20 м/с;
- точность определения скорости $\pm (0,2 \text{ м/с} + 0,2\% \text{ массового расхода})$;
- время сбора информации в экспериментальной точке $\sim 2 \text{ с}$.

Рабочей средой выступает воздух при нормальных условиях, приведенные результаты численного моделирования также получены для воздуха.

Исследуемый диапазон чисел Рейнольдса выбирался из штатных условий работы газодинамического контура экспериментального стенда. В расчетах рассматривались скорости потока в диапазоне от 10 м/с до 20 м/с.

Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета проводился по двум контрольным сечениям, отмеченные на рисунке 4.1 красными линиями:

1. Область за поворотом на расстоянии $\sim 0,7d$ от края поворота (Сечение *A-A*)
2. Область за блоком диффузор-конфузор на расстоянии $\sim 0,7d$ от края конфузора (Сечение *B-B*)

На каждом сечении в расчетах были отмечены сенсоры – точки, по которым производился анализ эксперимента. На рисунке 4.2 показана схема расположения сенсоров. В совокупности была определено около 200 сенсоров на каждое сечение. Эти точки соответствуют точкам экспериментального исследования.

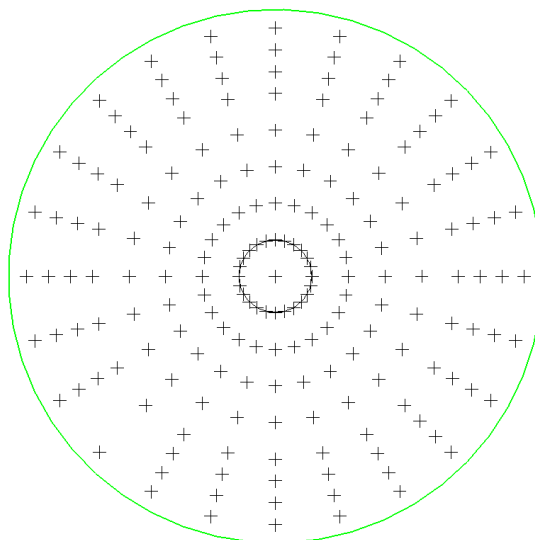


Рисунок 4.2 Расположение сенсоров в сечении измерения

В экспериментальном исследовании в каждом сечении зонд последовательно располагался в нескольких точках, координаты которых соответствовали точкам, представленным на рисунке 4.2. Среднерасходная скорость в выходном сечении измерялась с помощью термоанемометра

Согласно экспериментальным исследованиям, время сбора информации в точке составляло 2 с. Также в ходе исследования с коленом было установлено, что осредненная картина течения не меняется после 0.5 с. Поэтому конечный период анализа в вихреразрешающем подходе составил 0.5 с.

Для минимизации габаритных характеристик конструкции рассматривается совмещенный теплообменник с пористой вставкой, который является перспективной схемой для отбора тепла и выравнивания потока. С этой целью был проведен сравнительный анализ формирования потока внутри теплообменника с пористой вставкой и без нее как по RANS, так и по вихреразрешающему подходу моделирования. Схема конструкции теплообменника с пористой вставки типа МР представлена на рисунок 4.3.

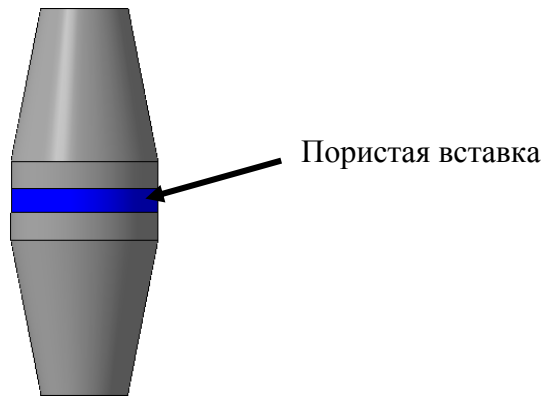


Рисунок 4.3 Размещение пористой вставки внутри теплообменника

В расчете пористая вставка инициализирована отдельным регионом, в котором длина региона вниз по потоку равна толщине пористой вставки в экспериментальной конструкции. Моделирование потока в пористой вставке проводилось по макромоделю Форхгеймера-Бринкмана, в которой инерционный и вязкостной коэффициенты были определены по экспериментальной кривой в виде зависимости $\frac{\Delta P}{\Delta l} = f(u)$ представленной на рисунке 4.4 [30].

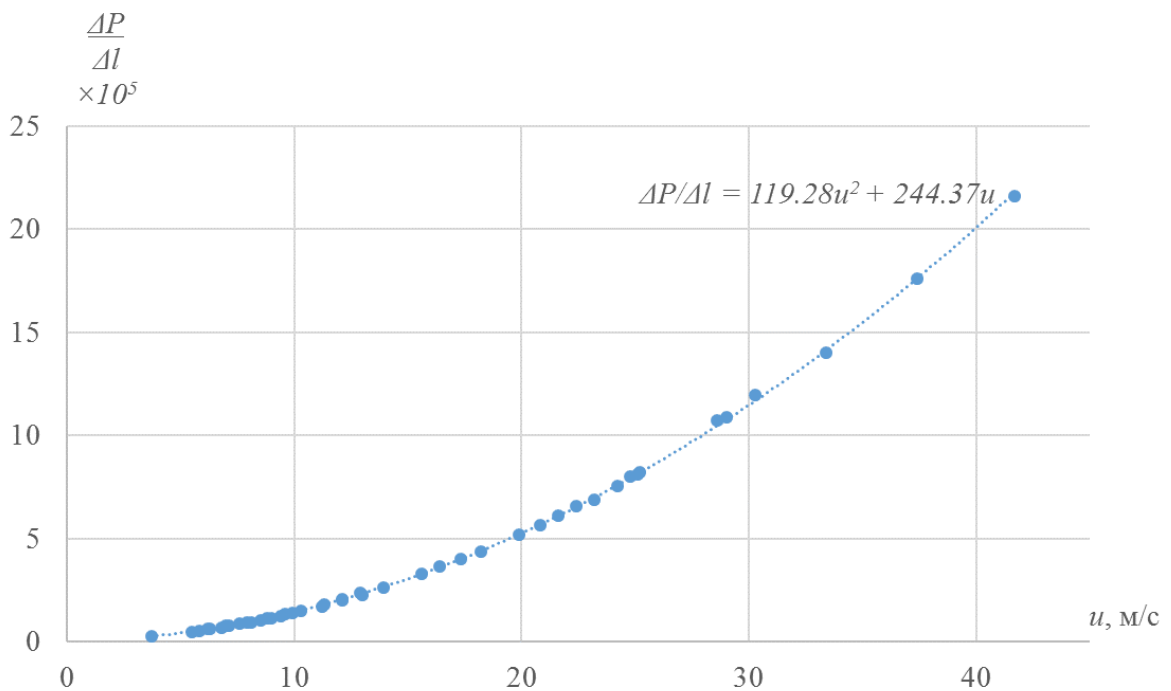


Рисунок 4.4 Зависимость перепада давления от входной скорости потока [30]

В RANS постановке использовалась двухпараметрическая модель турбулентности Ментера (SST). На входе задавались величина интенсивности турбулентного потока и линейный масштаб, определенных в соответствии со способами рассмотренных в главе 2. В

расчетах по RANS постановке была построена равномерная блочно-структурированная сетка с масштабом ячейки 0,85 мм и пограничным слоем, состоящим из 5 призматических слоев. Общее количество ячеек в модели составило $\sim 9 \times 10^6$.

Основу сеточной модели для вихреразрешающего подхода также составила блочно-структурированная сетка. Для LES области сеточная модель была построена с масштабом ячейки 0.425 мм, 15 призматическими слоями для описания пограничного слоя и состояла из $\sim 45 \times 10^6$ ячеек.

4.4 Результаты численного исследования

На основании разработанной технологии были проведены численные исследования течения в полномасштабной конструкции теплообменника. Анализ проводился по распределению маршевой компоненты скорости в поперечных сечениях за коленом и за конфузором. На рисунках 4.5 и 4.6 показаны результаты в контрольных сечениях стационарного расчета по RANS подходу и осредненные характеристики нестационарного режима счета вихреразрешающего подхода, а также экспериментальные данные для двух скоростей 10 м/с и 20 м/с. Результаты представлены в относительных единицах.

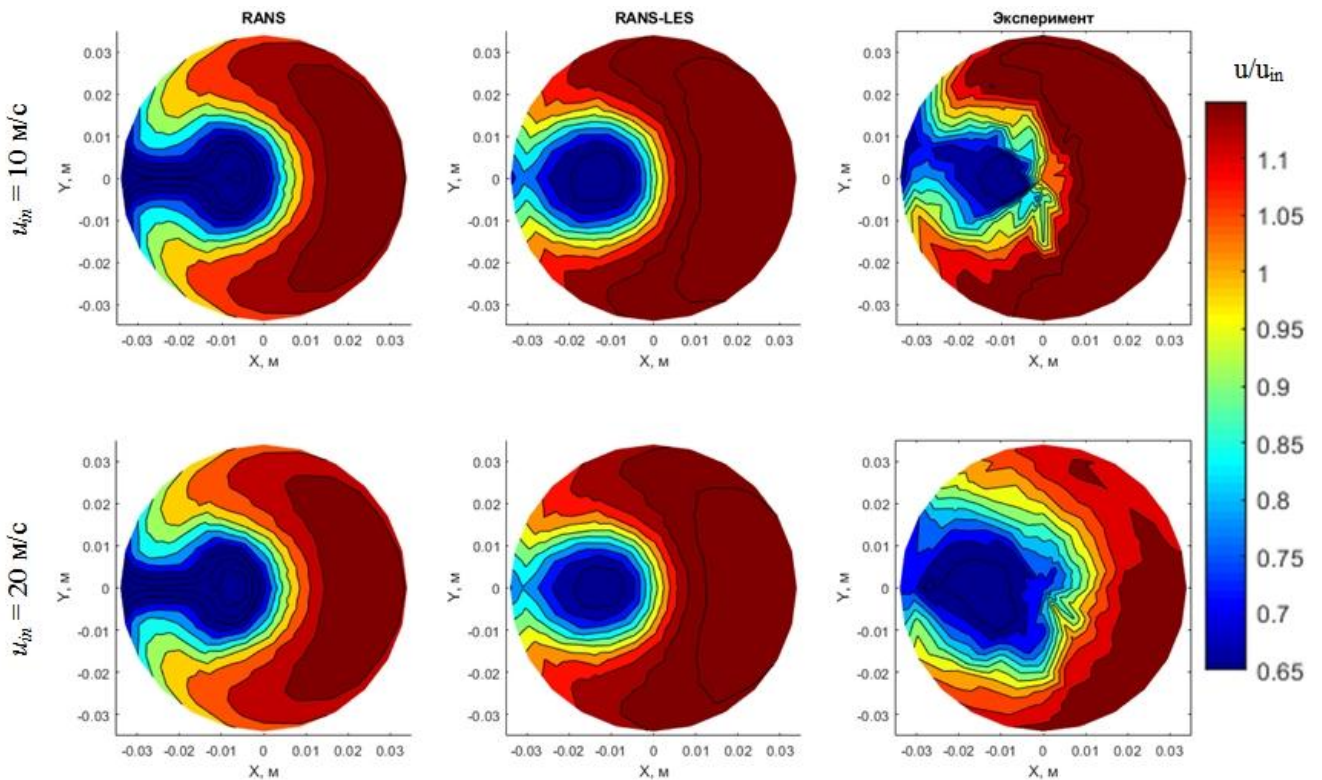


Рисунок 4.5 Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за поворотом

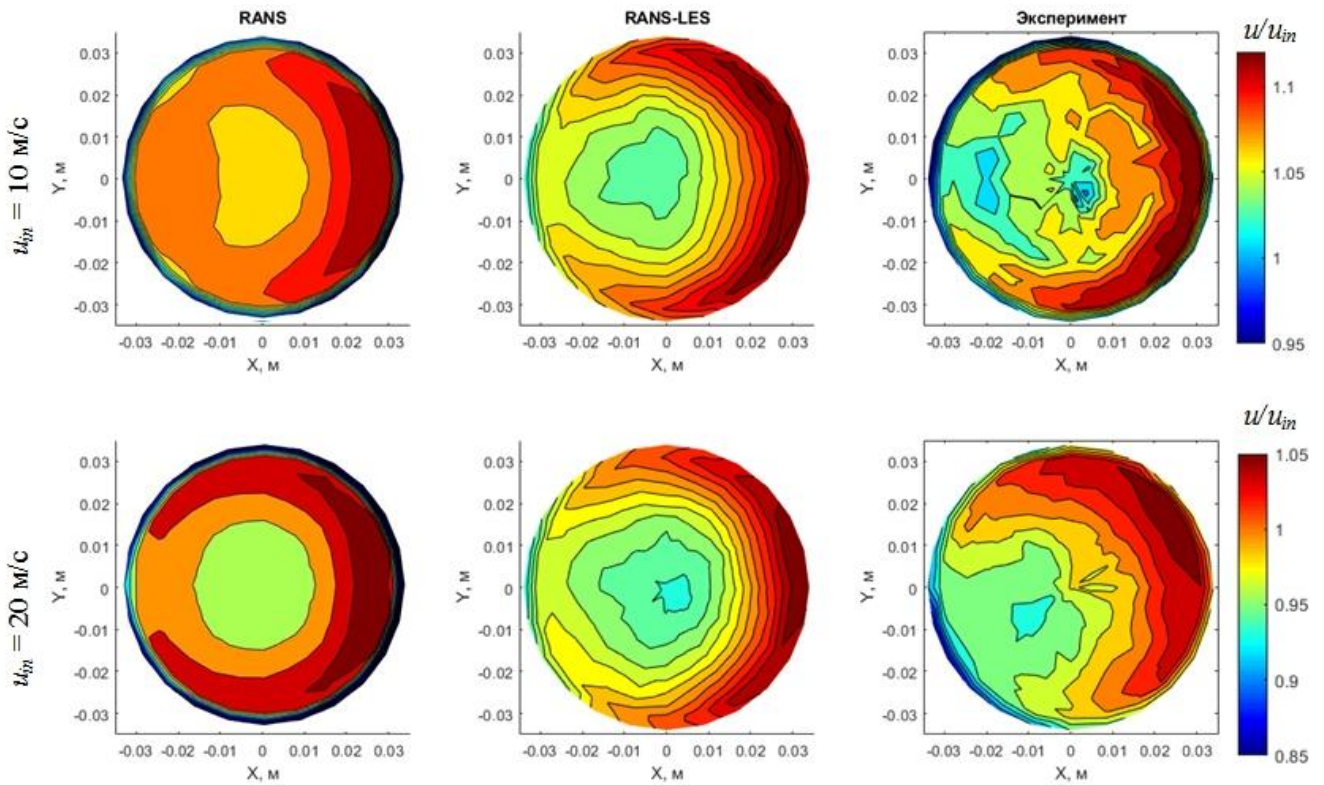


Рисунок 4.6 Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за конфузуром

По результатам анализа установлено, что основные характеристики потока качественно совпадают. В сечении за коленом, представленным на рисунке 4.5, отчетливо показаны расположение и форма застойной зоны, распределение основного потока. В сечении за конфузуром, представленным на рисунке 4.6, видно, что наиболее близкие к экспериментальным являются результаты с использованием вихреразрешающего подхода. Градиент по скорости в сечении снижается с 45% до 15%, размеры области вторичного течения идентичны размерам из экспериментальных данных. Отметим, что осредненные характеристики потока более гладкие, чем их мгновенные значения, что подтверждается экспериментальными данными. Экспериментальные данные указывают на асимметричность течения. Аналогичные картины наблюдаются в расчетах на основе вихреразрешающего подхода моделирования течения в нестационарном режиме, что иллюстрируется на рисунках 4.7 и 4.8, где показано мгновенное распределение скорости в различные моменты времени.

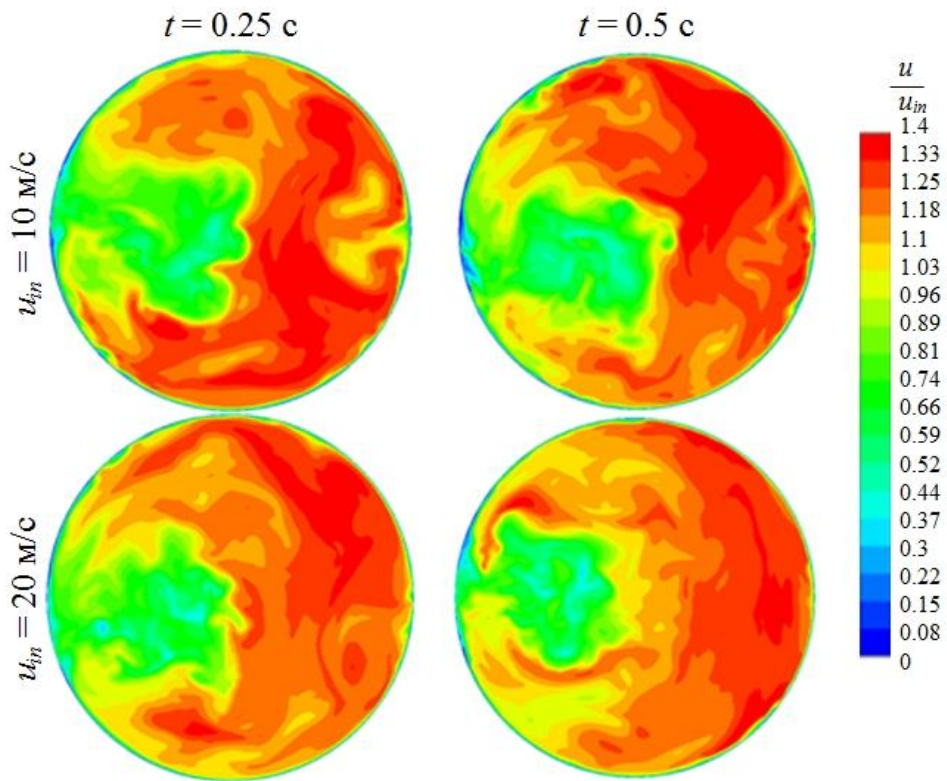


Рисунок 4.7 Распределения маршевой компоненты скорости в сечении за коленом в различные моменты времени

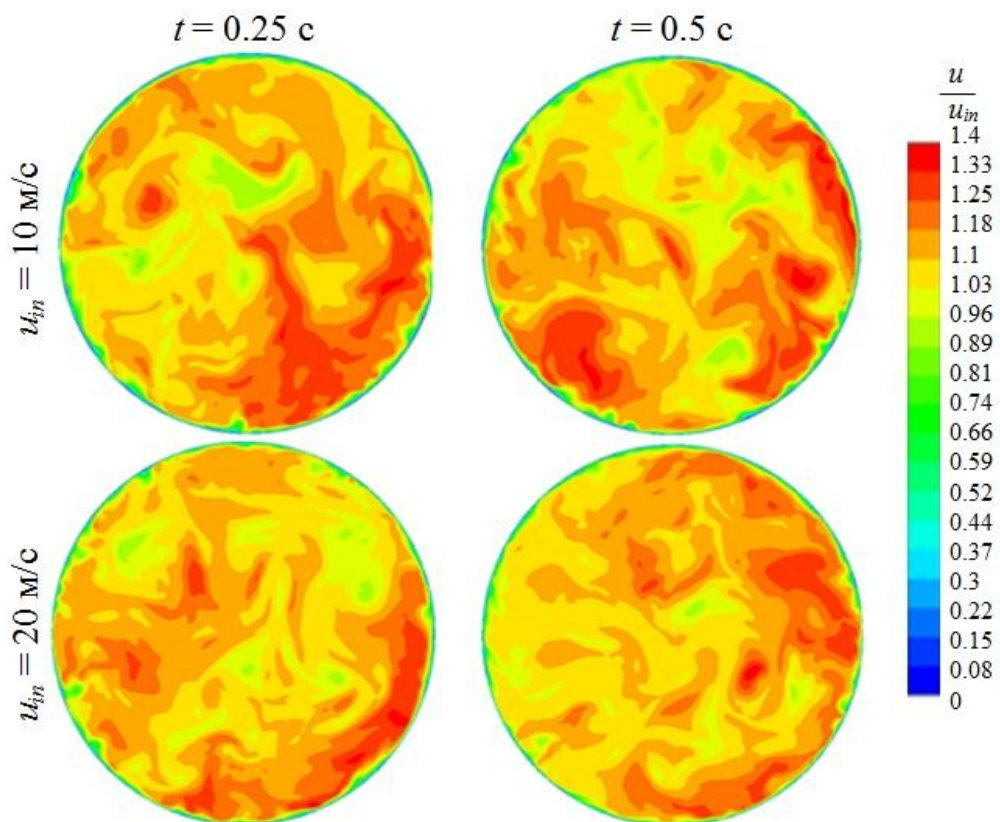


Рисунок 4.8 Распределения маршевой компоненты скорости в сечении за коленом в различные моменты времени

Из рисунков видно, что течение в конструкции нестационарное и имеет пульсации как в основном потоке, так и во вторичном течении. На рисунке 4.8 видно, что на выходе из теплообменника без пористой вставки в потоке по всему сечению канала присутствуют пульсационные характеристики по скорости на уровне 40%, имеющие стохастический характер.

Следующая серия расчетов была посвящена исследованию структуры потоков в теплообменнике с пористой вставкой. На рисунке 4.9 приводится сравнение результатов расчетов течения в конструкции теплообменника с пористой вставкой с экспериментальными результатами. На этих рисунках показано изменение маршевой компоненты скорости в конструкции теплообменника с пористой вставкой с использованием RANS и вихререзающих подходов моделирования в сечении за теплообменником (сечение Б-Б). Из качественного сопоставления структуры потока и количественных различий делается вывод, что лучшее согласование с экспериментальными данными показывает вихререзающий подход, чем RANS постановка.

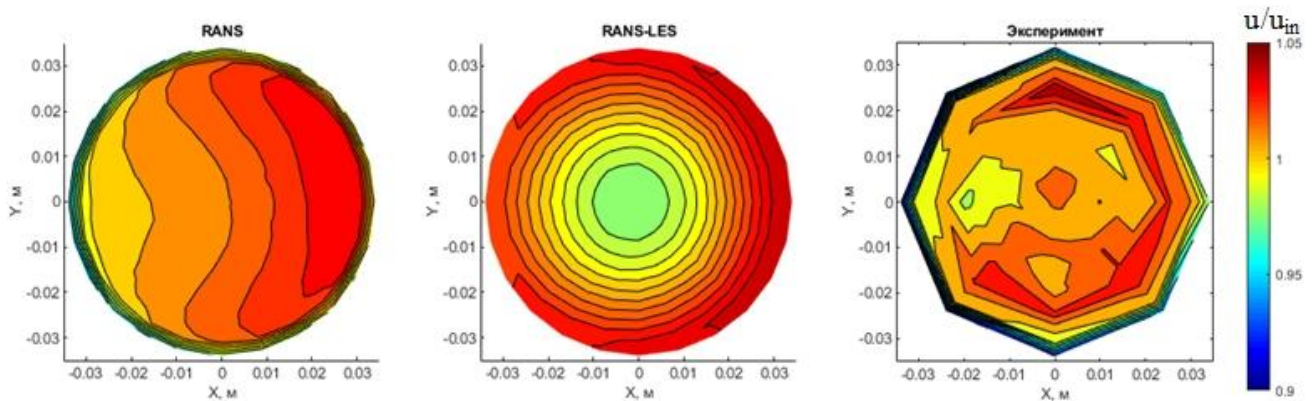


Рисунок 4.9 Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за теплообменником с учетом пористой вставки

На рисунке 4.10 иллюстрируется, что для данной конструкции, включающая пористую вставку существенно снижается уровень пульсаций в потоке. На этих рисунках видно, что без пористой вставки поток турбулентный, а с пористой вставкой он практически ламинарный.

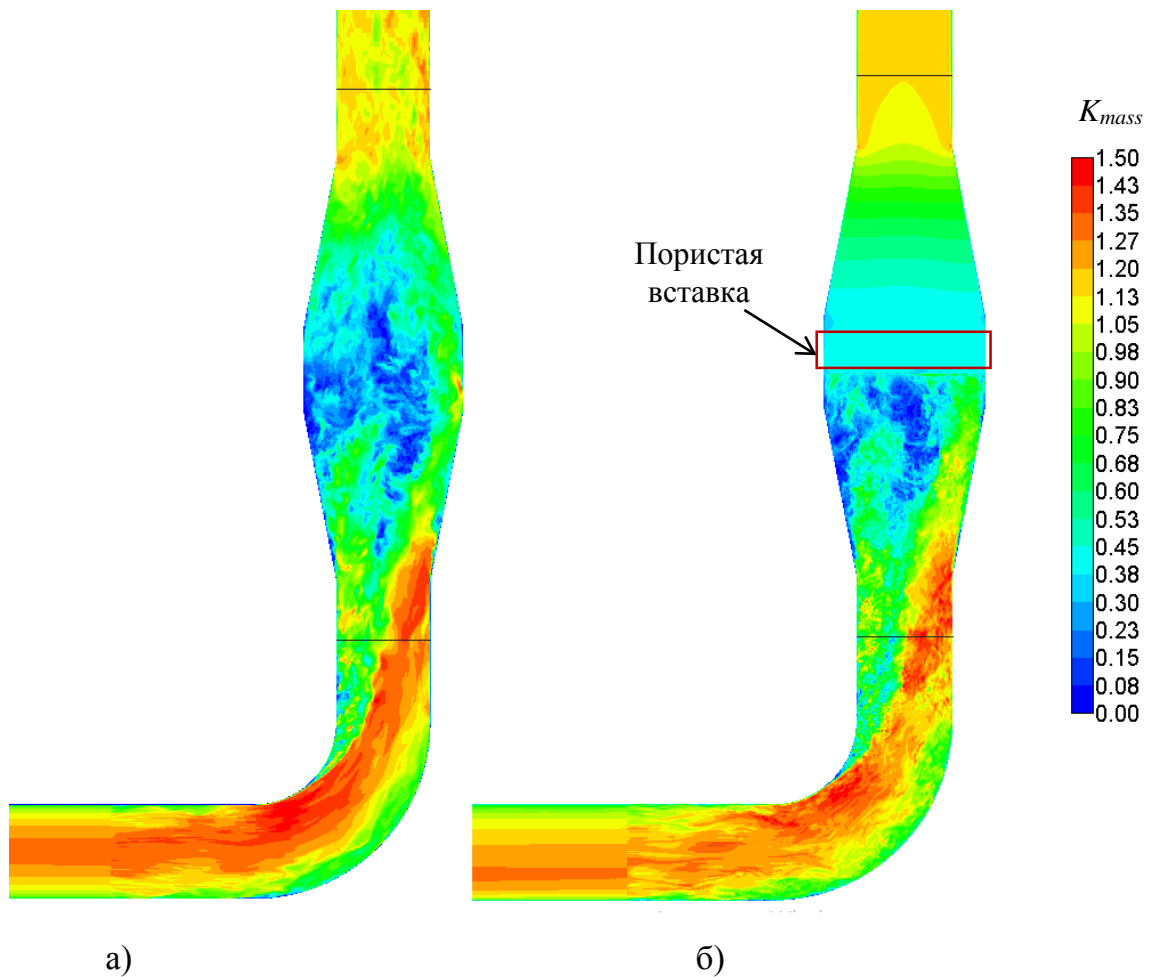


Рисунок 4.10 Распределение маршевой компоненты скорости относительно начальной скорости в продольном сечении в моделях без пористой вставки (а) и с пористой вставкой (б)

В качестве количественной оценки неоднородности потока используем изменение модуля завихренности по потоку, рассчитанного по формуле (2.13). На рисунке 4.11 представлены графики изменения модуля завихренности в теплообменнике между двумя экспериментальными сечениями $A-A$ и.

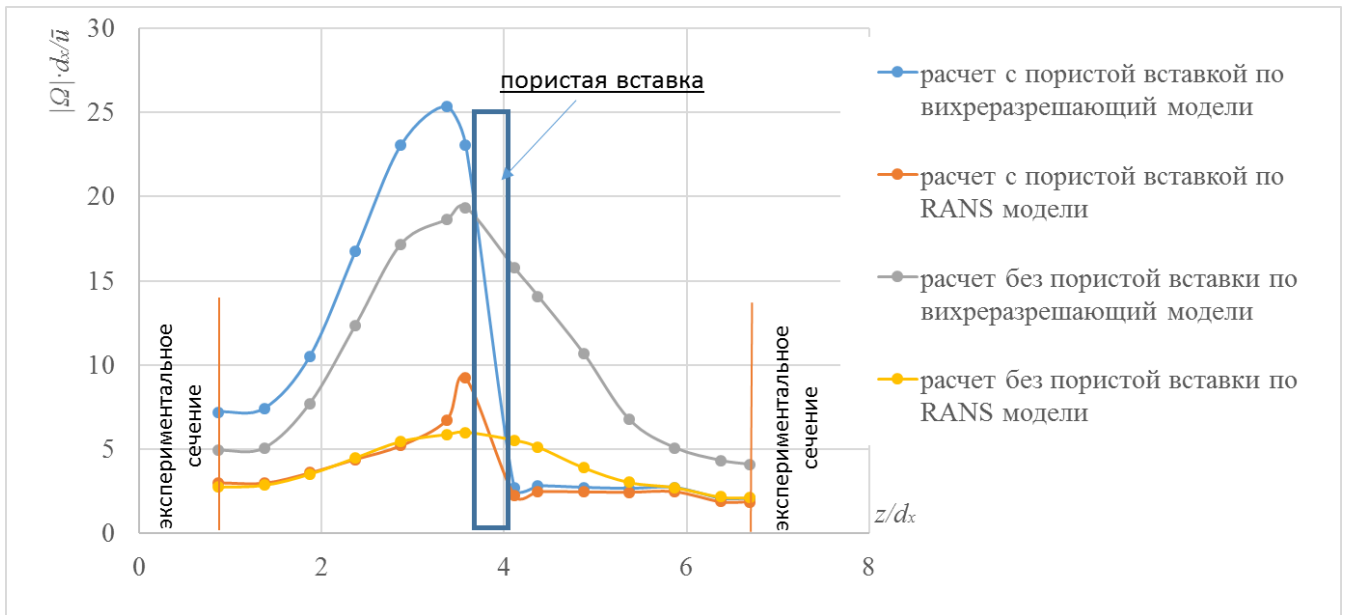


Рисунок 4.11 График изменения уровня завихренности между экспериментальными сечениями

Из графика видно, что в RANS постановках уровень завихренности существенно ниже за счет осредненных значений пульсаций в расчете. В то же время применение пористой вставки приводит к торможению потока и увеличению уровня завихренности вблизи нее. Более реалистичная картина описания турбулентности представлена в вихререзающем подходе. Моделирование турбулентных пульсаций в пористой вставке не происходит в силу наличия пористого скелета, поэтому уровень завихренности снижается до уровня расчета как в RANS.

4.5 Вывод по четвертой главе

1. Разработана расчетная технология полномасштабного моделирования течения в тракте газодинамического контура с пористыми вставками.
2. Численно исследовано течение в газодинамическом контуре с теплообменником с пористой вставкой и без нее. Анализ полученных результатов показывает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что указывает на перспективу использования разработанной расчетной технологии в проектировании перспективных изделий.
3. Получены оценки уровня завихренности по RANS и по вихререзающей моделям турбулентности с пористой вставкой в теплообменнике и без нее. Установлено,

что применение пористой вставки позволяет существенно снизить пульсации в потоке.

4. На основании проведенных численных исследований сформулирована конструкция устройства для выравнивания профиля скоростей потока жидкости или газа, на которую получен патент на изобретение.

Заключение

Основные результаты данной работы можно сформулировать следующим образом:

1 Численно исследована структура потока в газодинамическом контуре на основе вихреразрешающего подхода. Анализ результатов показывает, что течение принимает стохастический характер, при котором, происходит перемешивание по всему сечению канала. В тоже время осредненные характеристики линий тока повторяют двух зеркально симметричных вихревых движения, полученных по RANS подходу. Сделано предположение, что в фазовом пространстве линии тока осредненного по времени течения являются аттракторами траекторий отдельных частиц потока.

2 Влияние вторичного течения, порожденного поворотом трубы на 90° , оказывает влияние на основной поток на расстоянии 40-45 диаметров трубы. С применением пористой вставки, установленной на расстоянии 2 диаметров трубы от поворота, влияние вторичного течения сокращается до 3-4 диаметров трубы. В результате моделирования турбулентного течения показано, что порожденное поле завихренности для исследуемого профиля скорости сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы. Применение открытопористой структуры уменьшает уровень завихренности до значений аналогичных цилиндрической трубы с однородным потоком на расстоянии 0.2 диаметра трубы.

3 Показано успешное применение диакоптических методов в моделировании течения через пористую вставку на микро- и макроуровнях. Для микроуровня построена 3D модель фрагмента пористой вставки, проведена калибровка схемы построения геометрической модели в микромасштабе, сформулированы рекомендации для дальнейшей компоновки и моделирования детали из ОПС. Приведенные результаты позволяют численно моделировать открытопористые структуры и учитывать их в перспективных проектах. Подход численного моделирования структуры пористой вставки на микроуровне позволил получить детальную информацию о течении внутри пористой вставки, которая в последующем применяется в моделировании турбулентных течений на макроуровне. Получены параметры для описания пористого тела на основе уравнения Форхгеймера-Бринкмана. Для данной модели пористой вставки определен эффективный коэффициент диффузии. Полученные результаты указывают на перспективность использования пористой вставки типа ПСМ для различных практических приложений.

4 Численно исследовано течение на микроуровне в пористой вставке и за ней.

Из анализа полученных результатов следует, что для однородного потока формируются пульсации, размеры которых характеризуются масштабом пор. Возникающая при этом пульсационная картина затухает на расстоянии 5-6 характерных размеров порового пространства. Из исследований на микроуровне получены коэффициенты для описания течения в ОПС на макроуровне. В исследованиях на макроуровне показано, что крупные возмущения потока, обусловленные геометрией канала за счет применения ОПС, гасятся на расстоянии 3-5 диаметра трубы.

5 На основании моделирования спутного следа за пористой вставкой и спектрального анализа возмущений установлено, что пульсации, возникающие в потоке за счет пористой вставки, затухают 3-5 характерных размеров порового пространства.

6 На основании проведенных численных экспериментов обоснована применение ОПС для выравнивания профиля скорости потока в газодинамическом тракте газового лазера. На данное устройство получен патент.

7 Предложена расчетная технология для исследования структуры газодинамического потока для описания влияния различных конструктивных элементов на пульсационные характеристики потока в полномасштабной установке с пористыми вставками.

Дальнейшее развитие направления предполагает включение в численное исследование кинетики наработки активной среды и утилизация тепла, возникающего в процессе работы лазера с замкнутым циклом.

Работы автора по теме диссертации

Публикации в журналах, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science):

СВ1 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Некоторые результаты расчетов турбулентных течений в криволинейных каналах с использованием вихреразрешающего подхода // Журнал Средневолжского математического общества, 2024, Т. 26, № 4, С. 424-441. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202404.424-441 (**ВАК**)

СВ2 **T. Yu. Balabina** and Yu. N. Deryugin Multiscale modeling of gas dynamic flow characteristics through open-pored media // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2025, Vol. 46, No. 5, pp. 2312–2324 DOI: 10.1134/S1995080225607192 (**ВАК, SCOPUS, Web of Science**)

СВ3 **Балабина Т.Ю.**, Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальное исследование применения октрытопористых структур высокой пористости для выравнивания профиля турбулентного потока // Сибирские электронные математические известия, 2025, том 22, № 1, стр. 465-478 DOI: /10.33048/semi.2025.22.031 (**ВАК, SCOPUS, Web of Science**)

Публикации в прочих журналах:

СП1 **Балабина Т.Ю.** К вопросу о методах построения расчетных моделей пористых структур, применяемых в ядерных и изотопных установках, и оценке их неоднородности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №4. С. 42-53. DOI:10.46960/1816-210X_2021_4_43 (**ВАК**)

Публикации в трудах конференций:

ТК1 **Балабина Т.Ю.**, Емельянова Я.В., Уткина А.А. Численное моделирование процессов смешения спутных дозвуковых потоков в профилируемом сопле. В Тезисах докладов XVI Научно-технической конференции «Молодежь в науке», 25-27 октября 2017г. – г. Саров, Нижегород. обл. ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», – 2017. – С. 4.

ТК2 **Балабина Т.Ю.**, Емельянова Я.В., Уткина А.А. Численное моделирование процессов смешения спутных дозвуковых потоков в профилируемом сопле. В Сборнике докладов XVI Научно-технической конференции «Молодежь в науке», 25-27 октября 2017г. – г. Саров, Нижегород. обл. ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», – 2018. – Т.1. –

С. 39-44.

- ТК3 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Численное моделирование спутных осесимметричных потоков в трубе. В тезисах докладов XXII Всероссийской конференции «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики», посвященной памяти К.И. Бабенко (Дюрсо, 3-8 сентября 2018). – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. – с. 19 – 20.
- ТК4 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Некоторые результаты расчетов турбулентных течений в криволинейных каналах с использованием выхреразрешающего подхода В тезисах докладов X Международной научной молодежной школы-семинара «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» имени Е.В. Воскресенского (Саранск, 14-18 июля 2022). – Саранск.: СВМО, 2022. с. 24-26
- ТК5 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н. Применение открытопористых структур как ламинаризатор потока в канале. Численная оценка влияния конструкции на однородность течения В тезисах докладов XVI Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» (Саранск, 17-20 августа 2023). – Саранск.: СВМО, 2023. с. 25-28
- ТК6 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Определение параметров фильтрационной макромодели пористой вставки на основе прямого численного моделирования. II Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов и молодых ученых и специалистов математическое моделирование на Супер-ЭВМ экс- и зеттафлопсной производительности (Саров 25-29 сентября 2023 г.). Тезисы. – Саров.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023 с. 45-46.
- ТК7 **Балабина Т.Ю.**, Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. В Экспериментальное и расчетное моделирование влияния открытопористой структуры на однородность газового потока. Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: тезисы докладов IX Международной конференции (Нижний Новгород, 10 – 12 октября 2023 года). – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. – с. 34-36
- ТК8 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н. Численное исследование диффузионного перемешивания потоков на микроуровне в пористой вставке. III Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов и молодых

ученых и специалистов математическое моделирование на Супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности (Саров 2-8 декабря 2024 г.). Тезисы. – Саров.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024 с. 23-24.

ТК9 **Балабина Т.Ю.**, Дерюгин Ю.Н. Применение разномасштабных моделей в численном исследовании течения в криволинейном канале с пористыми вставками В тезисах докладов в XVII Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» (Саранск, 29-31 июля 2025). – Саранск.: СВМО, 2025. с. 53-57

Свидетельство о регистрации патента на изобретение:

СР1 Тимаев Д.С., Рогачев В.Г., Кудряшов Е.А, **Балабина Т.Ю.** и др. Устройство для выравнивания профиля скоростей потока жидкости или газа от 30.09.2021 г. № 2020131886

Список сокращений и условных обозначений

Условные обозначения

- \tilde{A} и \tilde{B} - размерные вязкостной и инерционный коэффициенты
- $A_{component}$ – постоянная Глэдстона-Дейла
- C_{KC} – постоянная Козени-Кармана
- C – доля пассивной примеси
- $C_{max\ трассера}$ - максимальной концентрации пассивной примеси
- C_p – теплоемкость
- D – молекулярная диффузия
- D_{eff} – эффективная диффузия
- d — диаметр
- d_n – диаметр поры
- $d_{n.c.p.}$ – средний диаметр поры
- d_x – характерных диаметр
- I – единичный тензор
- F – смоченная поверхность пор
- F_v – удельная смоченная поверхность
- $F(\Pi)$ – функция плотности вероятности пористости
- G – область
- H – поверхность, , ориентированная при помощи единичной нормали
- h – ширина потока
- K – проницаемость
- K_{mass} - отношения модуля скорости к массовой
- k_{eff} – эффективный коэффициент
- k_{res} - кинетическая энергия
- k_{sgs} – подсеточная энергия
- L – характерный размер пористого каркаса
- M – молекулярный вес
- N – размерность матрицы
- n – нормаль
- P – давление

Q – массовый расход

q – тепловой поток

R – вектор от центра ячейки до поверхности

Re – число Рейнольдса

r – радиус-вектор

$r_{\text{кривизны}}$ – радиус кривизны поверхности

S – тензор скоростей деформаций

$S_{\text{трассера}}$ – площадь пассивной примеси в поперечном сечении

s – площадь поперечного сечения

s_u – удельная площадь поверхности

Sc – число Шмидта

t – время

$u_{\text{mag}}(i,j)$ – модуль скорости в (i,j) ячейке

$u_x(i,j)$ – маршевая компонента скорости в (i,j) ячейке

u_0 – начальная скорость

u_ϕ – скорость фильтрации

u_n – скорость вещества в порах

\bar{u} – осредненное значение скорости

u' – пульсации скорости

V – полный объем

V_g – объем газа

V_m – объем материала конструкции

ΔP – перепад давления

Δl – толщина пористой вставки

$\Delta\phi$ – изменение фазы излучения

α, β – тензоры сопротивления пористого тела

ε – относительная погрешность

k – волновой вектор

λ – длина волны излучения

μ – динамическая вязкость

ν – кинематическая вязкость

ν – эффективная вязкость

ν_t – турбулентная вязкость

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления

ρ – плотность

ρ_s – плотность среды при нормальных условиях

σ – среднеквадратическое отклонение

τ – извилистость

τ_m, τ_t – молекулярная и турбулентная составляющие тензора касательных напряжений

Ω – тензор завихренности

ω – мера завихренности

Π – коэффициент пористости

Π_{eff} – эффективная пористость

$\Pi(i,j)$ – массив значений пористостей

Сокращения

CAD – Computer-aided design

CFD – Computational fluid dynamics

LES – Large Eddy Simulation

PISO – Pressure-Implicit with Splitting of Operators

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes

SA – однопараметрическая модель турбулентности Спаларта-Аллареса

SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation

SST – Shear Stress Transport- двухпараметрическая модель турбулентности Ментера

STEP – STandard for Exchange of Product model data

URANS – Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

АХЧ – амплитудно-частотные характеристики

ГОСТ – государственный стандарт

КЭ – конечный элемент

МР – металлорезина

ОПС – открытопористая структура

ППМ – порошковые пористые материалы

ПВМ – пористые волоконные материалы

ПЯМ – пористые ячеистые материалы

ПСМ – пористые сетчатые материалы

САПР – система автоматизированного проектирования

ТУ – техническое условие

Список литературы

- 1 Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Кузнецов М.М. Газодинамические проблемы в лазерной технике. Учеб. пособие– М.: МФТИ, 2015. – 103 с.
- 2 Звелто О. Принципы лазеров. Издание четвертое, изд-во Лань, Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, 2008, 724 с.
- 3 Айхлер С., Айхлер Г.-И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера – 2008.
- 4 Иванченко А.И., Оришин А.М., Воронцов С.С. Термогидродинамика CO₂-лазеров непрерывного действия с замкнутым циклом потока. // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т.41. № 1. – с. 3-13
- 5 Yacoby E., Sadot O., Barmashenko B D., Rosenwaks S. 2015 3D CFD modeling of subsonic and transonic flowing-gas DPALs with different pumping geometries Technologies for Optical Countermeasures XII; and High-Power Lasers 2015: Technology and Systems, edited by Harro Ackermann, Willy L. Bohn, David H. Titterton, Robert J. Grasso, Mark A. Richardson, Proc. of SPIE Vol. 9650, 96500E, doi: 10.1117/12.2208264
- 6 Barmashenko B. D., Rosenwaks S., Waichman K. 2015 Semi-analytical and CFD model calculations of subsonic flowing-gas DPALs and their comparison to experimental results XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014, edited by Chun Tang, Shu Chen, Xiaolin Tang, Proc. of SPIE Vol. 9255, 925520, doi: 10.1117/12.2070676
- 7 Zhdanov B.V., Rotondaro M.D., Shaffer M. K., Knize R. J. Low-pressure cesium and potassium diode pumped alkali lasers: pros and cons / Optical Engineering 55(2), 026105, 2015. DOI:10.1117/1.OE.55.2.026105
- 8 Pitzl G. A., Stalnaker D. M., Guild E. M., Olikier B. Q., Moran P. J., Townsend S.W., Hostutler D. A. 2015 Advancements in flowing diode pumped alkali lasers Proc. of SPIE Vol. 9729, 972902, DOI:10.1117/12.2217078
- 9 Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007, 240 с.
- 10 Борейшо А. С., Ивакин С. В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 304 с.: ил. (+вклейка, 8 с.). — (Учебники для вузов. Специальная литература).

- 11 White C. M., Streamline flow through curved pipes. Proc. Roy. Soc. London A 123, 645 A929).
- 12 Adler M., Strömung in gekrümmten Rohren. ZAMM 14, 257—275 A934].
- 13 Nippert H., Über den Strömungswiderstand in gekrümmten Kanälen. Forsch. Arb. Ing.-Wes. № 320 A929).
- 14 Richter H., Der Druckabfall in gekrümmten glatten Rohrleitungen. Forsch. Arb. Ing.-Wes. № 338 A930).
- 15 Dean W. R., The streamline motion of a fluid in a curved pipe. Phil. Mag. G) 4T 208 A927) и 5, 673 A928).
- 16 P.L. Spedding, E. Benard, G.M. McNally, Fluid flow through 90-degree bends, Dev. Chem. Eng. Miner. Process. 12 (1–2) (2004) 107–128.
- 17 Kim J., Yadav M., Kim S. Characteristics of Secondary Flow Induced by 90-Degree Elbow in Turbulent Pipe Flow // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2014. Vol. 8, Issue. 2. P.229–239.
- 18 K. Sudo, M. Sumida, H. Hibara, Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend, Exp. Fluids 25 (1) (1998) 42–49.
- 19 A. Kalpakli, R. Örlü, Turbulent pipe flow downstream a 90 pipe bend with and without superimposed swirl, Int. J. Heat Fluid Flow 41 (2013) 103–111.
- 20 T.J. Hüttl, R. Friedrich, Direct numerical simulation of turbulent flows in curved and helically coiled pipes, Comput. Fluids 30 (5) (2001) 591–605.
- 21 A. Noorani, G.K. El Khoury, P. Schlatter, Evolution of turbulence characteristics from straight to curved pipes, Int. J. Heat Fluid Flow 41 (2013) 16–26.
- 22 Dutta P., Saha S.K., Nandi N., Pal N. Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k-ε modelling // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2016. Vol. 19, Issue. 2. P.904–910.
- 23 А. А. Веденов, А. В. Губарев, А. М. Камчатнов, А. Ф. Мамзер, В. Р. Чечеткин Влияние турбулентности газового потока на угловую расходимость излучения в плоско-параллельном оптическом резонаторе
- 24 В.Д. Дубров, Ю.Н. Завалов Особенности турбулентного потока активной среды мощных CO₂-лазеров с аксиальной прокачкой газа
- 25 Karol Waichman*, Boris D. Barmashenko, and Salman Rosenwaks CFD assisted simulation of temperature distribution and laser power in pulsed and CW pumped static gas

DPALs Technologies for Optical Countermeasures XII; and High-Power Lasers 2015: Technology and Systems, edited by Harro Ackermann, Willy L. Bohn, David H. Titterton, Robert J. Grasso, Mark A. Richardson, Proc. of SPIE Vol. 9650, 96500C · © 2015 SPIE · CCC code: 0277-786X/15/\$18 · doi: 10.1117/12.2193879

26 В. В. Боровков, Б.В. Лажинцев, В. А. Нор-Аревян, А. Н. Сизов, А. А. Синянский, Г. И. Федоров Особенности газодинамики прокачных лазеров, возбуждаемых осколками деления ядер урана. // Квантовая электроника, – 1995. – Т. 22 № 12 – с.1187–1191.

27 Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Полищук С.Н., Лашкин С.В., Жучков Р.Н., Глазунов В.А., Яцевич С.В., Курулин В.В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013, 67 с.

28 ЛОГОС — Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования. [Электронный ресурс]. — URL: <http://logos.vniief.ru/>

29 Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.

30 Разработка и обоснование экспериментального стенда ФТ-18 для исследования процессов смешения в моделях различной геометрии – Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.М. Кузьма и [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. - № 2 (125). – с. 94-104. – DOI 10.46960/1816-210X2019_2_94

31 Hersman et al. Optical surface preservation techniques and apparatus, Patent US 9,653,869, 2017.

32 Интерференционные измерения оптических неоднородностей в активной среде лазера на парах щелочных металлов – А.А. Бабин, О.И. Белошицкая, В.А. Богачев, и [и др.] // Физика лазеров – 2015 – стр. 276-287.

33 Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Зея Мью Мьинт. Некоторые проблемы лазерной газодинамики // Materials digest of LI International Research and Practice Conference “Physical, Mathematical and Chemical Sciences: Theoretical Trends and Applied Studies”, - London: IASHE, 2013, pp. 32-34.

34 Харитонов В.В. Теплофизика лазерных зеркал: Учебное пособие – 3-е изд. // М.: Изд. МИФИ, 1993. – 152 с.

35 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: «Энергия», 1967

- 36 Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Справочник по теплопередаче. – М.: «Государственное энергетическое издательство», 1958
- 37 Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М.: Наука, 1966.
- 38 Christiansen W.H., Russell D.A., Hertzberg A. Flow lasers - Ann.Rev. Fluid Mech. 1975, vol.7, pp. 115-139.
- 39 Альгинов Р.А., Харламов С.Н. Ламинаризация газовых потоков в трубопроводах // ГИАБ, 2012, № 3 – с. 483-495
- 40 Лущик В.Г., Макарова М.С., Решмин А.И. Ламинаризация потока при течи с теплообменом в плоском канале с конфузуром // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2019, №1 – с. 68-77 doi: 10.1134/S0568528119010092
- 41 Авторское свидетельство СССР №664101, кл. G 01 P 5/00, 1979
- 42 Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1992.— 672 с: ил.
- 43 Аэродинамический эксперимент в машиностроении. изд. 3-е, доп. и испр. / Повх Н.Л. –Л., Машиностроение, 1974, с 131 – 134
- 44 Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление пористых сред // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016, № 2 – с. 42-51
- 45 Воронов Г. И. и др. Программный комплекс S-MPI для обеспечения разработки, оптимизации и выполнения высокопараллельных приложений на суперкомпьютерных кластерных системах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. — 2013. — Вып. 3. — С. 55–60.
- 46 Волков, К. Н., Дерюгин, Ю. Н., Емельянов, В. Н., Карпенко, А. Г., Козелков, А. С., Смирнов, П. Г., Тетерина, И. В. Реализация параллельных вычислений на графических процессорах в пакете вычислительной газовой динамики ЛОГОС // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. – 2013. – Т.14. – №1. – С. 334-342.
- 47 Гридин В.Н., Анисимов В.И., Альмаасали С.А. Применение метода диакоптики для моделирования и расчета больших систем // Проблемы управления, 2014, № 4 – с. 9 – 13.
- 48 Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 336 с.

- 49 Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Козелков А.С., Тетерина И.В. Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / Под ред. Проф. В.Н. Емельянова, д.ф.-м.н. К.Н. Волкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 416 с.
- 50 Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. – 2-е изд. Перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981, 247 с.
- 51 Белов С.В., Витязь П.А., Шелег В.К. и др. Пористые проницаемые материалы: Справ. изд. М.: Metallurgiya, 1987, 335 с.
- 52 Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд. / Н.Е. Леонтьев. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 88 с.
- 53 П.В. Москалев Математическое моделирование пористых структур / П.В. Москалев, В.В. Шитов – М.: Книга по Требованию, 2013. – 118 с.
- 54 Koronen A., Kataja M., Timonen J. 1997. Permeability and effective porosity of porous media. *Phys Rev.* 56 (3): 3319-3325. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.56.3319>
- 55 Koronen A., Kataja M., Timonen J. 1998 Simulation of single-fluid in porous media. *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 9, No. 8: 1505-1521. <https://doi.org/10.1142/S0129183198001369>
- 56 Koronen A., Kataja M., Timonen J. 1996. Tortuous Flow in Porous Media. *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics.* doi: 54.406-410. 10.1103/PhysRevE.54.406.
- 57 Анциферов В.Н. От египетских пирамид до космоса // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №5. – С. 109–114.
- 58 Анциферов В. Н., Макаров А. А., Ханов А. М., Башкирцев Г. В. Модели и свойства высокопористых ячеистых материалов // Перспективные материалы. – 2010. - №3 – с. 5-9.
- 59 Шейдеггер, А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды / А. Э. Шейдеггер. – М.: Гос. изд. нефт. и горно-топл. лит., 1960. – 250 с.
- 60 Kozeny J. 1927. Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden, 136. *Sitzungsber Akad Wiss, Wien.*
- 61 Carman P.C. 1937. Fluid flow through granular beds. *Trans Inst Chem Eng.* 15: 150-166.
- 62 Koronen A. et al. 2017. The effect of void structure on the permeability of fibrous networks, *Transport Porous Med*, 117(2), 247-259.

- 63 Nabovati, A. and Sousa, A.C.M. (2007) Fluid Flow Simulation in Random Porous Media at Pore Level Using the Lattice Boltzmann Method. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2, 226-237.
- 64 Clennell M.B. 1997. Tortuosity: a guide through the maze. Geol Soc, London. SPE Publ. 122: 299-344. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.122.01.18>
- 65 Ghanbarian B., Hunt A.G., Ewing R.P., Sahimi M. 2013. Tortuosity in porous media: a critical review. *Soil Sci Soc Am J*. 77:1461-1477. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0435>
- 66 Barrande M., Bouchet R., Denoyel R. 2007. Tortuosity of porous particles. *Anal Chem*. 79 (23):9115-9121. <https://doi.org/10.1021/ac071377r>
- 67 Mason El., Malinauskas A., Evans R. 1967. Flow and Diffusion of Gases in Porous Media. *The Journal of Chemical Physics*. doi: 46. 10.1063/1.1841191.
- 68 Latrille Ch., Zoia An. 2011. Estimating apparent diffusion coefficient and tortuosity in packed sand column by tracers experiments. *Journal of Porous Media*. doi: 14. 507. 10.1615/JPorMedia.v14.i6.40.
- 69 Saripalli K. Pr., Serne R. J., Meyer Ph. D., McGrail B.P. 2002. Prediction of Diffusion Coefficients in Porous Media Using Tortuosity Factors Based on Interfacial Areas. *Ground Water*. 40. 346 - 352. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02512.x.
- 70 Espinoza M., Andersson M., Sunden B. 2017. Computational Time and Size Domain Analysis of Porous Media Flows Using the Lattice Boltzmann Method. *Computers & Mathematics with Applications*. Doi:74. 89. 10.1016/j.camwa.2016.12.001.
- 71 Wang H., Yin Y., Hui X.Y., Bai J., Qu Zh. 2020. Prediction of effective diffusivity of porous media using deep learning method based on sample structure information self-amplification. *Energy and AI*. 2. 100035. doi:10.1016/j.egyai.2020.100035.
- 72 Ramaswamy S., Gupta M., Goel A., Aaltosalmi U., Kataja M., Koponen A., Ramarao B.V. 2004. The 3D structure of fabric and its relationship to liquid and vapor transport. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 241. 323-333. doi: 10.1016/j.colsurfa.2004.04.023.
- 73 Gostick J.T., Fowler M. W., Pritzker M. D., Ioannidis M. A., Behra L. M. 2017/ In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers. Department of Chemical Engineering University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.096>

- 74 Gommaes C.J., Bons A.J., Blacher S., Dunsmuir J.H., & Tsou A.H. (2009). Practical methods for measuring the tortuosity of porous materials from binary or gray-tone tomographic reconstructions. *Aiche Journal*, 55, 2000-2012.
- 75 Grathwohl P. 1998. Diffusion in natural porous media: contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics / by P. Grathwohl. Springer science+business media, LLC 207p. doi: 10.1007/978-1-4615-5683-1
- 76 Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
- 77 Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/34TVN415
- 78 Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. 4th ed. Springer, 2013. 778 pp.
- 79 Ghisalberti M., Nefz H. The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies // *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3, 2006. pp. 277–301.
- 80 Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. Москва: Недра, 1993. 416 с.
- 81 Skjetne E., Auriault J.-L. 1999. High-Velocity Laminar and Turbulent Flow in Porous Media // *Transport in Porous Media* August p. 131 – 147. doi: 10.1023/A:1006582211517
- 82 Zeng Z., Grigg R. 2006 A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media // *Transport in Porous Media* 63: 57–69 doi 10.1007/s11242-005-2720-3
- 83 Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles // *Applied Scientific Research*, Vol. 1, 1947. pp. 27–34.
- 84 Tilton N., Cortezzi L. Linear stability analysis of pressure-driven flows in channels with porous walls // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 604, 2008. pp. 411–445.
- 85 Ochoa-Tapia J.A., Whitaker S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-I. Theoretical development // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, 1995. pp. 2635–2646.
- 86 Ochoa-Tapia J.A., Whitaker S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-II. Comparison with experiment. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, 1995. pp. 2647–2655.
- 87 Martys N., Bentz D.P., Garboczi E.J. Computer simulation study of the effective

viscosity in Brinkman equation // *Physics of Fluids*, Vol. 6, 1994. pp. 1434–1439.

88 Le Bars M., Worster M.G. Interfacial conditions between a pure fluid and a porous medium: implications for binary alloy solidification // *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 550, 2006. pp. 149–173.

89 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1986.

90 Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

91 Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей - М.: ИЛ, 1961-929 с.

92 Spallart P.R., Allmaras S.R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. // *La Recherche Aerospaciale*, 1994, № 1, 5-21

93 Wilcox D.C. 1998. “Turbulence Modelling for CFD”. 2nd edition, DCW.

94 Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в двух томах. - М:Мир, 1991.

95 Гарбарук А. В. Современные подходы к моделированию турбулентности: учеб. пособие / А. В. Гарбарук [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.

96 Гарбарук А.В. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений: конспект лекций. СПб: 2010. – 127 с. [https://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/doc/Lecture_turbulence_models.pdf]

97 Launder B.E., Spalding D.B. / *Lectures in mathematical models of turbulence.* / London – New-Jork, Acad. Press. 1972.

98 Агустинович В.Г., Шмотин Ю.Н., Сипатов А.М. и др. Численное моделирование нестационарных явлений в газотурбинных двигателях. - М.: Машиностроение, 2005. С.536

99 Kraichnan R. 1970. Diffusion by a random velocity field // *The Physics of Fluids* 13(1).

100 Адамьян Д.Ю., Стрелец М.Х., Травин А.К. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на входных границах LES области в рамках комбинированных RANS–LES подходов к расчету турбулентных течений // *Мат. моделирование*,

2011, т. 23, № 7, 3–19 с.

101 Tweedt D. L., Chima R. V., Turkel E. 1997. Preconditioning for Numerical Simulation of Low Mach Number Three-Dimensional Viscous Turbomachinery Flows,” AIAA Paper 97-1828.

102 Адамьян Д.Ю. Эффективный метод генерации синтетической турбулентности на входных границах LES области в рамках комбинированных RANS-LES подходов к расчету турбулентных течений // Математическое моделирование, том 23, № 7, с. 3–19.

103 Jarrin N., Prosser R., Uribe J. et al. Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a Synthetic-Eddy Method // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2009. Vol. 30, no. 3. Pp. 435–442.

104 Баренблатт, Г. И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.

105 Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз; пер. с англ. Р. Л. Салганика; под ред. Г. И. Баренблатта. – М.: Изд-во Мир, 1964. – 184 с.

106 Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1947 (Образцовая тип.). - 244 с.

107 Fukasawa T., Deng Z.-Y., Ando M., Ohji T., Goto Y. 2001. Pore structure of porous ceramics synthesized from water-based slurry by freeze-dry process/ Journal of Materials Science 36 2523 – 2527. doi:10.1023/A:1017946518955

108 Valli A., Hyväluoma J., Jäsberg A., Koponen A., Timonen J. 2009. Pressure Drop for Low Reynolds-Number Flows Through Regular and Random Screens. Transport in Porous Media. 80. 193-208. doi:10.1007/s11242-009-9350-0.

109 Espinoza A.M., Sundén B., Andersson M., Yuan J. 2015. Analysis of porosity and tortuosity in a 2D selected region of solid oxide fuel cell cathode using the lattice Boltzmann method. In ECS Transactions (Vol. 65, pp. 59-73). Electrochemical Society. <https://doi.org/10.1149/06501.0059ecst>

110 Vu J. 2017. Modelling of Convective Heat Transfer in Porous Media. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 4852. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4852>

111 Митричев И.И., Кольцова Э.М., Женса А.В. Компьютерное моделирование газодинамической обстановки внутри каналов высокопористого ячеистого материала // Фундаментальные исследования, – 2012 г. - № 11 – с. 440-446.

- 112 «Суперкомпьютер Ломоносов» [Электронный ресурс]. – URL: <https://parallel.ru/cluster/lomonosov.html>
- 113 Центр коллективного пользования «Вычислительный центр»: многопроцессорные супер-ЭВМ различного класса для предоставления вычислительных услуг предприятиям Госкорпорации «Росатом» а также высокотехнологичным отраслям промышленности, науки и образования. ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», г. Саров. — [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/partnership/ckp/computing>
- 114 «Суперкомпьютерные технологии ФГУП РФЯЦ - ВНИИЭФ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://iani.unn.ru/assets/docs/РФЯЦ-ВНИИЭФ.pdf>
- 115 Описание архитектуры Ansys Fluent/CFX. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ansys.com/>
- 116 Описание архитектуры Star-CD/CCM+. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cd-adapco.com/>
- 117 Описание архитектуры Comsol. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.com/>
- 118 Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. -3., rev. ed. - Berlin; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.
- 119 Issa R.I. Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting // Journal of Computational Physics. 1986. Vol. 62. P. 40-65.
- 120 Борисенко О. Н., Гиниятуллина А. Г., Кузьменко М. В., Попова Н. В., Потехина Е. В., Смолкина Д. Н., Турусов М. Р., Черенкова М. В., Чухманов Н. В. Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ ЛОГОС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 25—39
- 121 Голубев А.А, Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Козелков А.С., Силаев Д.П., Симонов П.Г. Пакет программ ЛОГОС. Разработка и реализация алгебраического много-сеточного метода. XIV международная конференция. Супервычисления и математическое моделирование. Саров, 2012, 58.
- 122 Smirnov A., Shi S., Celik I. 2001. Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling // J. Fluids Eng 123(2), 359-371.
- 123 Stephen B.Pope 2000.Turbulent flows. Cambridge University Press UK – 807 p.

- 124 Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). — М.: Машиностроение, 1983. — 351 с. ил.
- 125 Зарянкин, А. Е. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей: учебник для вузов / А.Е. Зарянкин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014. — 590 с.
- 126 Юдов Ю.В. Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем: дисс. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.14 / Юдов Юрий Васильевич; науч. Рук. Ю.А. Мигров; НИТИ. — Сосновый Бор, 2021 — 277с.
- 127 Волков К.Н., Емельянов В.Н. Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике / под ред. Волкова К.Н., Емельянова В.Н. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. С. 338
- 128 Все о T-FLEX CAD [Электронный ресурс] / T-FLEX CAD. — Режим доступа: <http://www.tflexcad.ru/> (дата обращения 18.02.2020)
- 129 Компас 3D. Официальный сайт [Электронный ресурс] / Компас-3D. — Режим доступа: <http://kompas.ru> (дата обращения 19.02.2020)
- 130 Жижкин А.М. Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР / В сборнике: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды международной научно-технической конференции. — Самара, 2003. — С. 185-190.
- 131 Шошин С.Н., Кременчугский М.В., Казаков Р.А., Линяев Д.А., Способ изготовления пористой детали из проволочного материала, Патент на полезную модель RU 2663389 С1, 03.08.2018.
- 132 ГОСТ 6613-86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Государственный стандарт: дата введения 01.01.88 . — М.: «Стандартинформ», 2006 — 12 с.
- 133 Кудрявцев Л.Д. Курс математического анализа (в двух томах): Учебник для студентов университетов и вузов. М.: Высшая школа, 1981, т. II: 584 с.
- 134 Никольский С.М. Курс математического анализа: Учебник для вузов. — 5-е изд., перераб.— М.: Физико-математическая литература, 2000. — 592 с.
- 135 ТУ 1276-003-38279335-2013. Проволочные тканые сетки Техническое условие: дата введения 2013-07-12 / ООО «Торговый дом сеток». — М.: 2013. — 25 с.
- 136 Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том I. — М.: изд-во «Наука» 1969 г. — 607 с.

137 Д.П. Тимофеев Кинетика адсорбции. М.: Издательство академии наук СССР, 1962. – 252 с.

138 А.М. Жижкин, Г.В. Лазуткин, М.А. Брылева, Г.В. Изранова, С.В. Путилин Влияние структуры пористого материала МР на его расходные характеристики // Вестник СамГУПС №4 (38), 2017 с. 16-24

139 Hong J., Zhu B., Ma Y., Chen L. Experiments on static characteristics of metal rubber particles // Beijing Hangkong Hantian Daxue Xuebao // Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2012. V. 38. N. 2. P. 218-221.

140 Белоусов А.И. Исследование гидродинамических и фильтрованных характеристик пористого материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев, 1975. Вып. 2 – с. 70-80.