

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

На правах рукописи

Тищенко Виктор Александрович

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ВЛАЖНО ПАРОВОГО ПОТОКА В
ЭЛЕМЕНТАХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОМАШИН**

Специальность 05.04.12 - Турбомашинны и комбинированные турбоустановки

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Грибин В.Г.

Москва 2014

Содержание	Стр.
Введение	4
Глава 1. Обзор литературных данных	7
1.1. Характер распределения крупнодисперсной влаги в последних ступенях турбин.....	9
1.2. Краткий обзор экспериментальных методов определения характеристик жидкой фазы	17
1.2.1. Определение размеров капель	17
1.2.2. Определение скоростей капель	21
1.3. Структура капельной среды за сопловыми решетками турбины.....	23
1.3.1. Области проявления эрозионно-опасной влаги за сопловой решеткой.....	23
1.3.2. Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой турбины	28
1.3.3. Характер течения водяной пленки на поверхностях лопатки.....	32
1.3.4. Срыв водяной пленки с выходной кромки лопатки	37
1.4. Механика движения крупнодисперсной влаги в проточных частях турбомашин.....	43
1.4.1. Силы, действующие на частицу в потоке газа.....	43
1.4.2. Моделирование течения влажного пара.....	45
1.4.3. Движение крупнодисперсных частиц в межлопаточном сопловом канале	50
1.5. Современные методы исследования скоростных характеристик потока.....	55
1.6. Постановка задачи на исследование	59
Глава 2. Экспериментальный стенд, модели и методика исследований.....	62
2.1. Методика экспериментальных исследований	62
2.1.1. Тепловая схема экспериментальной установки.....	62
2.1.2. Система пневмометрических измерений ИВК МІС-300М.....	64
2.1.3. Прибор теневой автоколлимационный ИАБ-451	67
2.1.4. Система лазерной диагностики потоков «Полис».....	69
2.1.5. Измерение размеров капель с помощью метода инерционного осаждения.....	73
2.1.6. Рабочая часть и исследуемые объекты	74
2.1.7. Методика измерения параметров течения влажно парового потока.....	91
2.2. Методика расчетных исследований	93
2.2.1. Математическая модель расчета	93

2.2.2. Расчетные схемы исследуемых объектов	95
2.2.3. Порядок проведения численного моделирования	100
Глава 3. Разработка методики бесконтактного определения средних размеров крупной влаги.....	102
3.1. Уравнение движения капли в потоке	103
3.2. Алгоритм определения средних размеров капель вдоль траекторий	106
3.3. Разработка методов пост обработки мгновенных полей скоростей в условиях двухфазного потока	109
3.4. Расчет траекторий капель по осредненным векторным полям	114
3.5. Модификация математической модели расчета влажнопарового потока в CFD коде Ansys Fluent	116
3.5.1. Модель турбулентности	117
3.5.2. Свойства воды и водяного пара.....	121
3.6. Верификация CFD кода Ansys Fluent	127
3.6.1. Течение перегретого пара в сопле Лавая.....	128
3.6.2. Течение влажно парового потока в изолированной сопловой решетке....	132
3.7. Апробация методики бесконтактного определения средних размеров капель .	139
Глава 4. Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой.....	145
4.1. Особенности распределения капельных потоков за сопловой решеткой	146
4.2. Характеристики крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой	156
4.3. Влияние ρ на характеристики капель за сопловой решеткой	182
4.4. Обобщенные характеристики крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой.....	192
Выводы по работе.....	195
Список используемой литературы	199

Введение

На данный момент энергетика является основополагающим базисом для развития всех областей жизнедеятельности человеческой цивилизации. Основная часть выработки электроэнергии в мире приходится на тепловую и атомную энергетику. Несмотря на громадный опыт, накопленный за более чем столетнюю историю эксплуатации электростанций, на данный момент остается острая необходимость в повышении эффективности и надежности основного оборудования ТЭС и АЭС.

Одним из элементов тепловой схемы электростанции, в котором существует высокий задел для совершенствования, является паровая турбина и в особенности последние ступени ЦНД. При этом характер течения среды в этом участке проточной части турбины до конца не изучен ввиду сложности протекающих газодинамических процессов. В первую очередь это связано с наличием дискретной среды в потоке влажного пара, что приводит к интенсификации большого количества процессов термодинамического и механического взаимодействия. О них на данный момент имеются довольно подробные фундаментальные представления, однако их прикладное применение к конкретным инженерным задачам порой оказывается невозможным. Таким образом, подробная картина течения трехмерного двухфазного потока в последних ступенях до сих пор не построена.

Основной целью повышения экономичности и надежности паровых турбин является минимизация негативных эффектов, проявляющихся при течении многофазной среды – безвозвратные потери кинетической энергии, а также эрозионные процессы разрушения рабочих лопаток. Для решения этих непростых задач был проведен ряд мероприятий (сепарация влаги из проточной части турбины, использование новейших материалов и наплавки и так далее), которые позволили существенно повысить характеристики турбоагрегатов. Не смотря на это, исследования в области влажнопаровых потоков и попытки доработки конструктивных особенностей последних ступеней продолжают и по сей день.

Полученные за последние сто лет результаты экспериментального исследования влажнопаровых потоков служат надежным источником при проектировании современных паротурбинных установок. Однако время не стоит на месте, и постоянно растущая потребность в производстве дешевой электроэнергии ставит перед инженерами новые задачи в совершенствовании конструктивных особенностей машин. Это стимулирует к дальнейшему развитию экспериментальных исследований в рассматриваемой проблемной области. При этом активное развитие экспериментальных методов исследования (системы лазерной диагностики, пневмометрических и оптических измерений), а также бурное совершенствование численного решения задач механики сплошных сред (совместно с ростом вычислительных возможностей компьютеров и кластеров) создают благоприятные предпосылки для более детального изучения особенностей течения двухфазной конденсирующейся среды. Кроме того, появляется возможность для построения работоспособных математических моделей описания процессов, протекающих при взаимодействии дискретной среды с основным потоком.

В данной диссертации представлено расчетно-экспериментальное исследование движения влажнопарового потока за плоской изолированной сопловой решеткой. Работа с применением современных методов изучения двухфазных сред (как экспериментальных, так и численных) проводилась в лаборатории оптико-физических исследований (ЛОФИ) кафедры ПГТ НИУ МЭИ под руководством профессора, доктора технических наук Грибина В.Г. Эта лаборатория была одним из наиболее значимых центров по исследованию влажнопаровых потоков в период 60- 80^{ых} годов прошлого века. Здесь было решено большое количество прикладных и фундаментальных проблем, связанных с течением двухфазных сред в элементов проточных частей турбомашин. В 2007 году при непосредственном участии автора, эта лаборатория подверглась глубокой модернизацией, включавшей себя замену всей арматуры и штатных систем измерения. На данный момент ЛОФИ, оборудованная по последнему

слову техники, способна решать широкий круг задач, связанных с течением двухфазных сред в проточных частях турбомашин.

В настоящей работе разработана экспериментально-расчетная методика определения средних размеров капель, а также рассматривается характер движения крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, всему коллективу ЛОФИ и своей семье. Отдельную признательность хотелось бы выразить Гаврилову И.Ю. за длительную и плодотворную совместную научную деятельность и дружбу. Также автор хотел бы отметить важный вклад в результаты своей работы со стороны механиков ЛОФИ – Маликова Е.И и Третьякова В.И.

Глава 1. Обзор литературных данных

С момента появления первых конденсационных паровых турбин вот уже на протяжении более ста лет проводятся экспериментальные исследования течения влажного пара в их проточных частях. При этом далеко не все важные проблемы решены к настоящему времени с необходимой полнотой. Поэтому наряду с изучением конкретных инженерных вопросов при проектировании современных экономичных последних ступеней паровых турбин, необходимо продолжение фундаментальных расчетно-экспериментальных исследований для выявления особенностей движения дискретной фазы в спутном потоке пара, а также изучения процессов, проявляющихся при течении двухфазной среды.

В целом, наличие в потоке дискретной фазы или условий для ее возникновения приводят к интенсификации следующих процессов [22]:

- Неравновесность процесса расширения в решетках ступени.
- Появление скачков конденсации при сверхзвуковых скоростях.
- Скольжение, взаимодействие с пленками, дробление и коагуляция капель в ступени.
- Увеличение интенсивности трения в пространственных пограничных слоях на поверхности лопаток вследствие присутствия пленок.
- Торможение капельным потоком рабочей решетки.
- Специфическая конденсационная нестационарность.
- Нарушение расчетного (оптимального) обтекания профилей решеток.
- Отклонение параметров в зазорах от расчетных значений.
- Увеличение выходных потерь.
- Эрозионные и коррозионные повреждения сопловых и рабочих лопаток.

Присутствующие в канале частицы дискретной фазы характеризуются в первую очередь дисперсным составом, который определяет основные параметры влаги в потоке. Условно их можно разделить на крупнодисперсные и мелкодисперсные [80]:

- Мелкодисперсная влага – характерный размер соответствует величине $d_k < 2$ мкм. Частицы, движутся вдоль линий тока паровой фазы.
- Крупнодисперсная влага - $d_k > 2$ мкм. Частицы движутся с существенным скольжением по отношению к паровой фазе.

Необходимо отметить, что данная градация является условной, так в работе [46] крупными каплями являются те, размеры которых больше 4 мкм, в работе [38] – 10 мкм, а в [86] – 5 мкм. Как показано в [43] критерий разделения капель на крупные и мелкие в полной мере определяется геометрией канала и режимом течения. При этом автор [22] считает, что более правильно вообще отказаться от такой градации, так как совершенно очевидно, что капли размером 5-30 мкм имеют иные гидродинамические характеристики и оказывают иное влияние на несущую фазу, чем капли 0,1-1 и 100-300 мкм. Тем не менее, крупнодисперсная влага является основным источником эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток цилиндров низкого давления паровых турбин [70]. В качестве примера, на Рисунке 1.1 представлены фотографии поврежденных рабочих лопаток вследствие воздействия на них крупных капель [136].

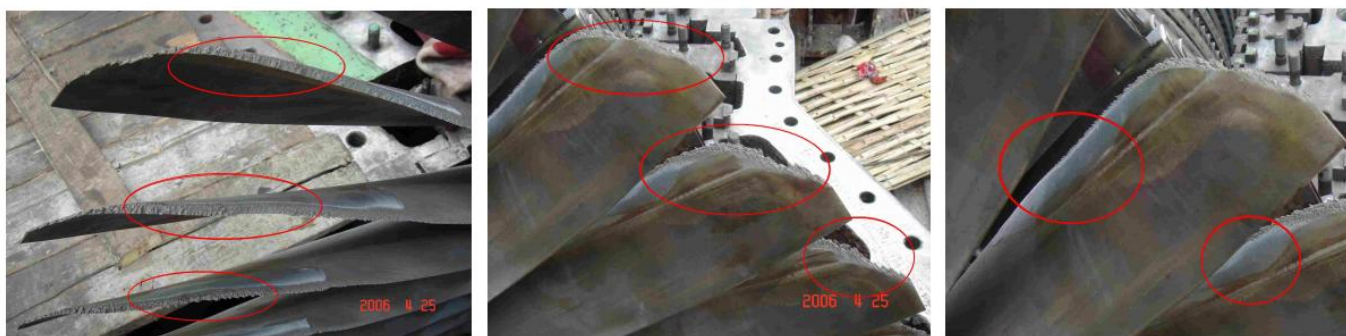


Рисунок 1.1.

Эрозионный износ рабочих лопаток последней ступени

Актуальность проблемы эрозионного износа рабочих лопаток на данный момент стоит довольно остро. Это вызвано необходимостью проектирования высокоэкономичных паровых турбин с повышенной площадью выхлопа и как следствие большой окружной скоростью. Обобщенные данные о характере эрозионного повреждения лопаток, представленные в [58], указывают на то, что

увеличение скорости соударения (вследствие увеличения окружной скорости) и рост размеров капель, попадающих на поверхность рабочих лопаток турбины, существенно интенсифицируют процессы износа материала. Например, при окружной скорости порядка 400 м/с предельное значение влажности перед рабочей решеткой последней ступени не должно превышать 10%, а при 500 м/с – 4% [76] При этом авторы отмечают на недостаточную изученность характеристик жидкой фазы в межлопаточном зазоре.

1.1. Характер распределения крупнодисперсной влаги в последних ступенях турбин

Дискретная фаза в последних ступенях паровых турбин распределена довольно неравномерно [69, 30, 35, 44, 46, 48]. Экспериментальные исследования, проведенные на модельных и натуральных турбинах, показывают, что наибольшая массовая составляющая влаги сконцентрирована у периферии. На Рисунке 1.2 представлено распределение относительной степени влажности по высоте за рабочей решеткой ступеней большой верности по данным различных организаций, обобщенных в работе [109]. На основе представленных данных можно сделать вывод, что существенное влияние влажности на характер течения двухфазной среды будет проявляться именно в периферийных сечениях ступени. Распределение абсолютного значения влажности по высоте, измеренное перед последней ступенью экспериментальной паровой турбины [125], подтверждает данный вывод (см. Рисунок 1.3). При этом помимо характера распределения массовой составляющей в турбине важно знать дисперсный состав влаги. Это в первую очередь необходимо для предсказания местоположения зон эрозионного износа. Существует большое количество исследований, проведенных в этой области [136, 125, 80]. Из них следует, что капли, движущиеся в проточной части турбины имеют преимущественно малые размеры.

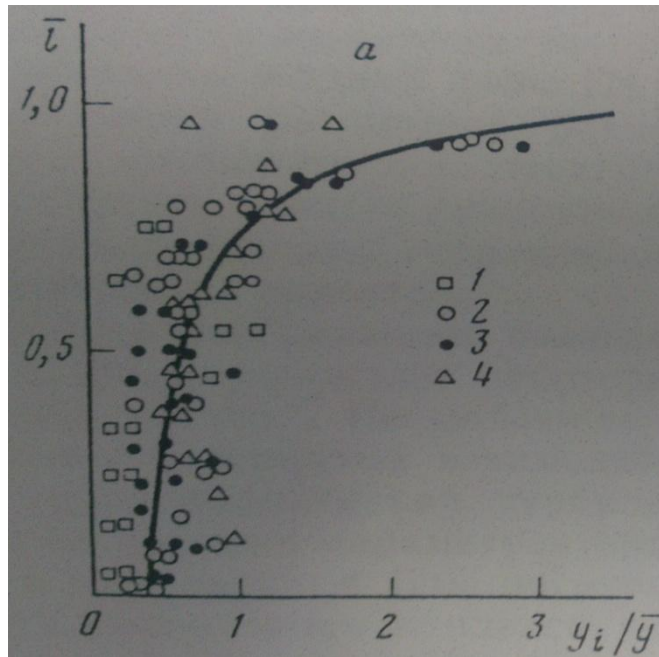


Рисунок 1.2.

Распределение относительной степени влажности по высоте за рабочей решеткой ступеней большой верности по данным различных организаций. 1 – опыты ЦКТИ, 2 – ХТГЗ, 3 – МЭИ, 4 – Паметрада

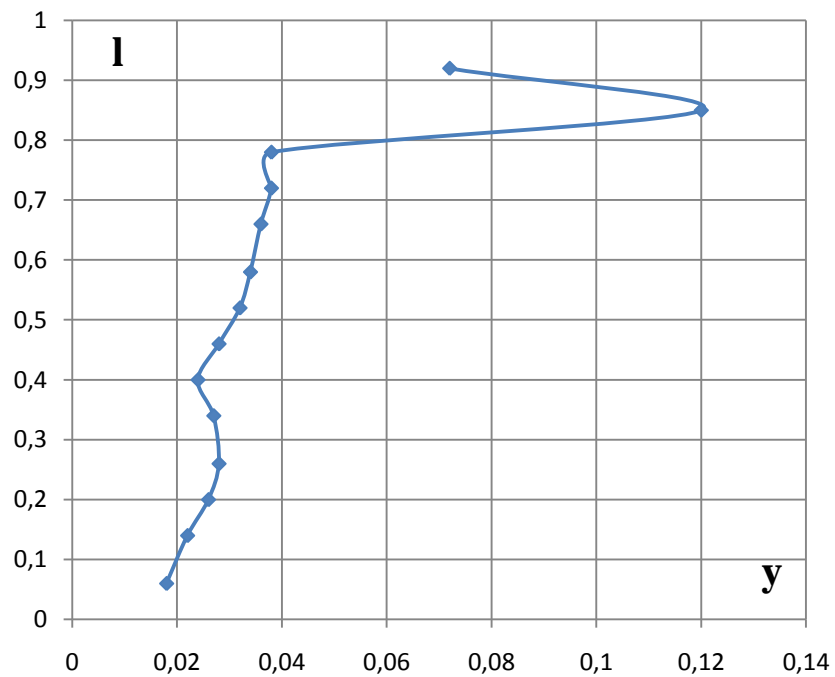


Рисунок 1.3.

Распределение влажности перед последней ступенью турбины по высоте

Данные экспериментальные результаты подтверждаются работами по выявлению крупной влаги в последних ступенях паровой турбины мощностью 500 МВт и экспериментальной машине [112, 46]. Масса крупных капель в этих исследованиях определялась зондом-ловушкой, аналогичным зонду отпечатков, и зондом инерционного осаждения. В данных исследованиях массовая составляющая крупных капель в потоке оказалась в диапазоне 5-8% процентов от общей массовой составляющей жидкой фазы. Кроме того порядка 40% всей влаги перед последней ступенью сконцентрировано в периферийных сечениях. Подробный анализ дисперсного состава крупных капель в турбине выполнен в работе [136] с помощью специально разработанного оптического зонда по измерению размеров частиц дискретной фазы в точке на турбине с номинальной мощностью 350 МВт. На Рисунке 1.4 представлены распределения влажности мелкодисперсных и крупнодисперсных капель при различных режимах работы машины. Как видно из Рисунка, при работе турбины на номинальном режиме (350 МВт) в области периферийных сечений массовая составляющая крупных капель оказалась выше, чем мелкодисперсной влаги.

В той же работе рассматривается распределение размеров крупных частиц на различных высотах лопатки (см. Рисунок 1.5). Как видно из представленных данных, в области периферии лопатки дисперсный состав капель больших размеров заполняется наиболее полно в широком диапазоне диаметров – в потоке присутствуют частицы дискретной фазы размерами от 50 мкм до 400 мкм.

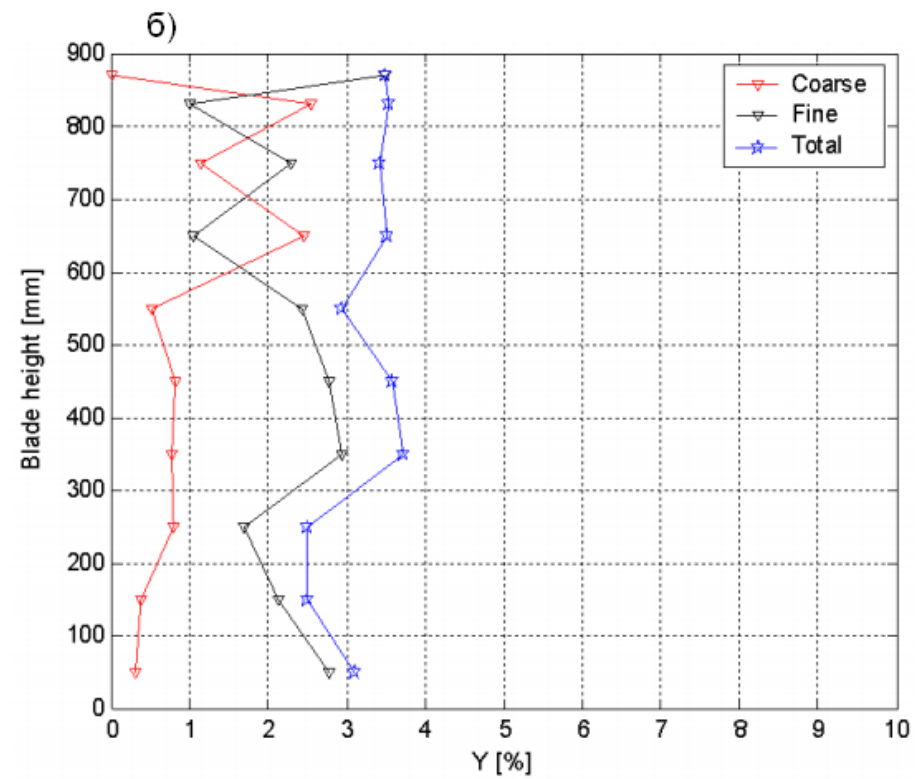
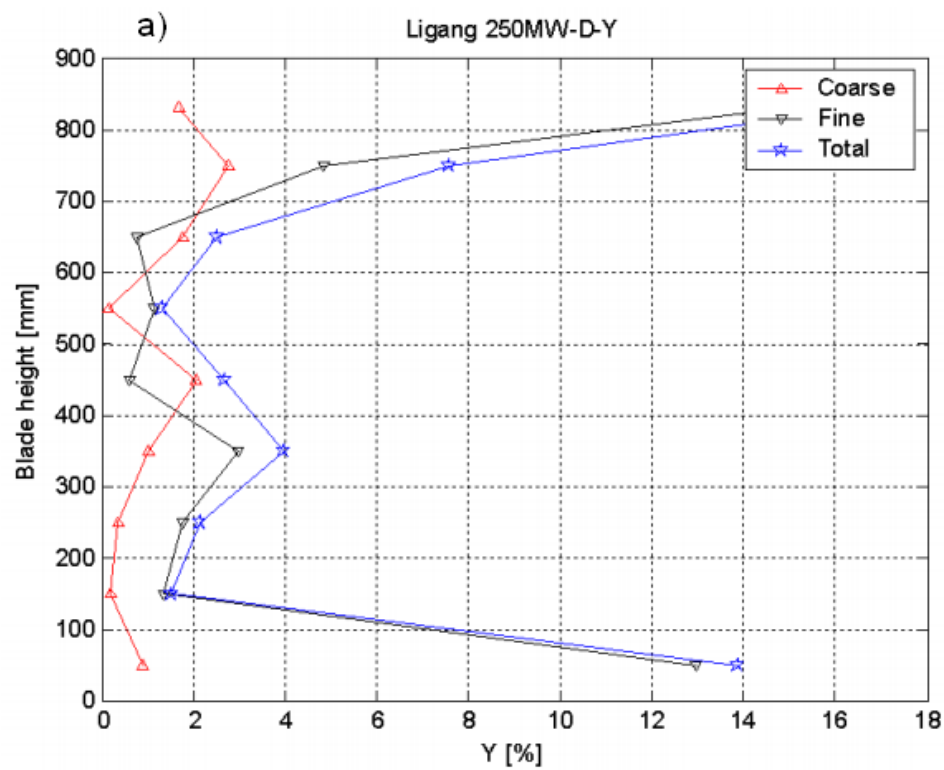


Рисунок 1.4.

Изменение влажности (массовой составляющей от всего расхода влажнопарового потока) крупных (coarse), мелких (fine) и суммарной массовой составляющей (total) по высоте за последней ступенью при различных значениях мощности турбины. а: 250МВт; б: 350 МВт

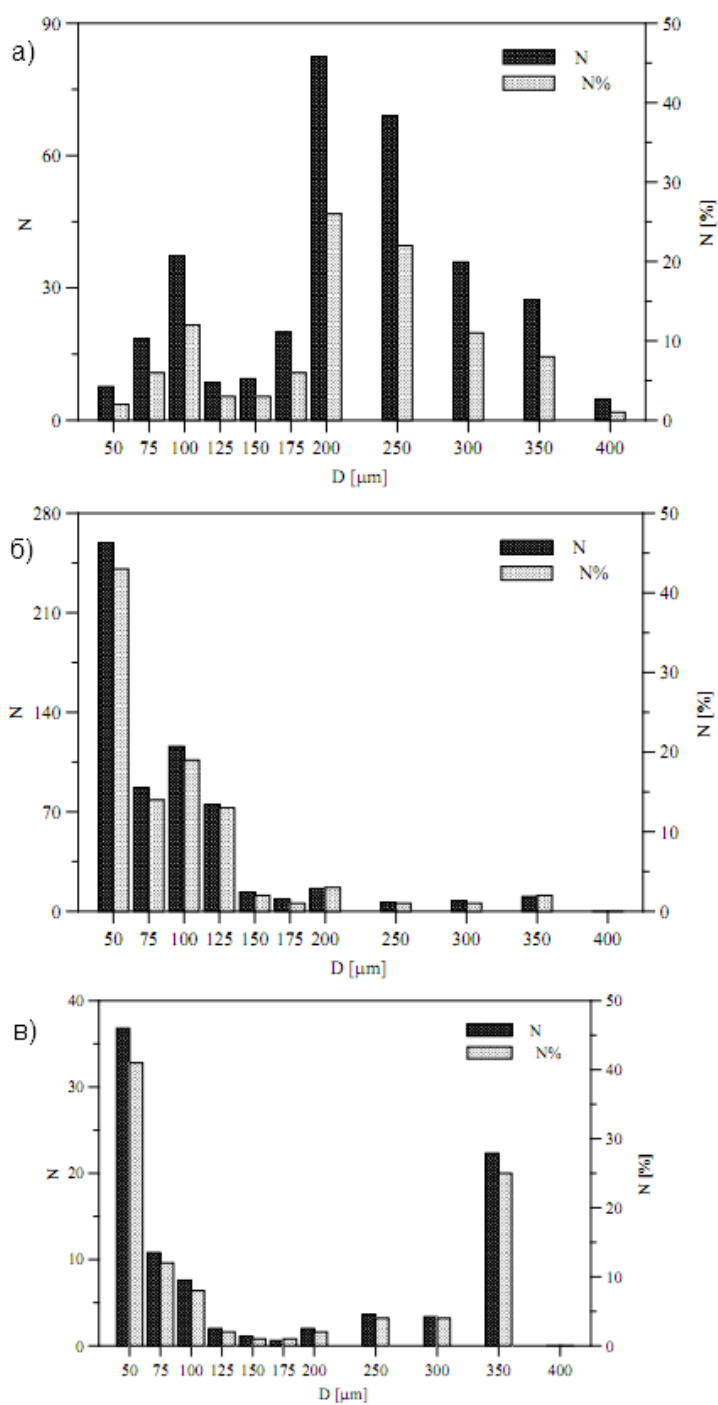


Рисунок 1.5.

Распределение диаметров крупных капель по количеству за последней ступенью турбины мощностью 350 МВт. а: периферийное сечение (830 мм); б: среднее сечение (550 мм); в: область в районе корня лопатки (50 мм)

Похожие результаты были получены в работе [138]. Авторы исследовали характер распределения крупной влаги перед и за последними ступенями двух паровых турбин; некоторые результаты проведенных замеров представлены на Рисунке 1.6. Здесь величина f_c :

$$f_c = \frac{M_c}{M_{total}}, \quad (1.1)$$

где M_c – локальный массовый расход крупных капель в точке; M_{total} – суммарный массовый расход жидкой фазы.

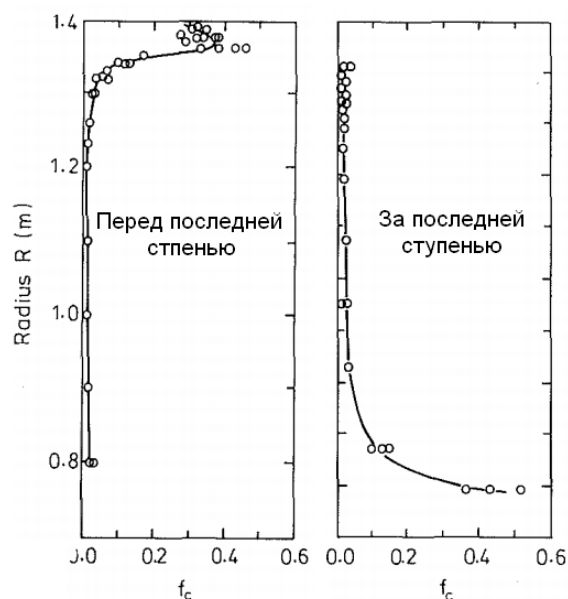


Рисунок 1.6.

Распределение доли крупной влаги перед и за ступенью по отношению к суммарному расходу дискретной фазы по высоте

Полученные данные позволяют говорить о том, что практически по всей высоте ступени доля крупной влаги находится в диапазоне 2-4%, и только на периферии (перед последней ступенью) наблюдается существенный рост массовой составляющей крупнодисперсных частиц, который достигает 50%. При этом увеличение доли крупных капель в корневой области за последней ступенью авторы считают ошибкой экспериментальной методики и объясняют погрешность низким расходом пара в этой области (имеет место вихревое течение в прикорневой области).

Повышенная концентрация крупных капель в паровом потоке вблизи периферии ступени объясняется характером ее движения и возникновения в проточной части паровой турбины. Как показано в [77] первичное образование мелкодисперсного тумана в результате неравновесной конденсации пара происходит либо в ядре потока в сопловом канале, либо в области кромочного следа. Дальнейшая конденсация происходит преимущественно на образованных каплях. Передвижение жидкой фазы в межлопаточный канал рабочей решетки приводит к тому, что на стенках профилей начинает формироваться водяная пленка в силу воздействия на нее центробежных сил, начинает смещаться ближе к периферии, и, срываясь, формирует крупнодисперсные частицы. В работах [88, 138] этот вопрос довольно подробно рассмотрен на натуральных турбинах. Важным результатом этих исследований оказалась картина траекторий крупнодисперсной влаги в цилиндрах низкого давления паровых турбин. (см. Рисунок 1.7).

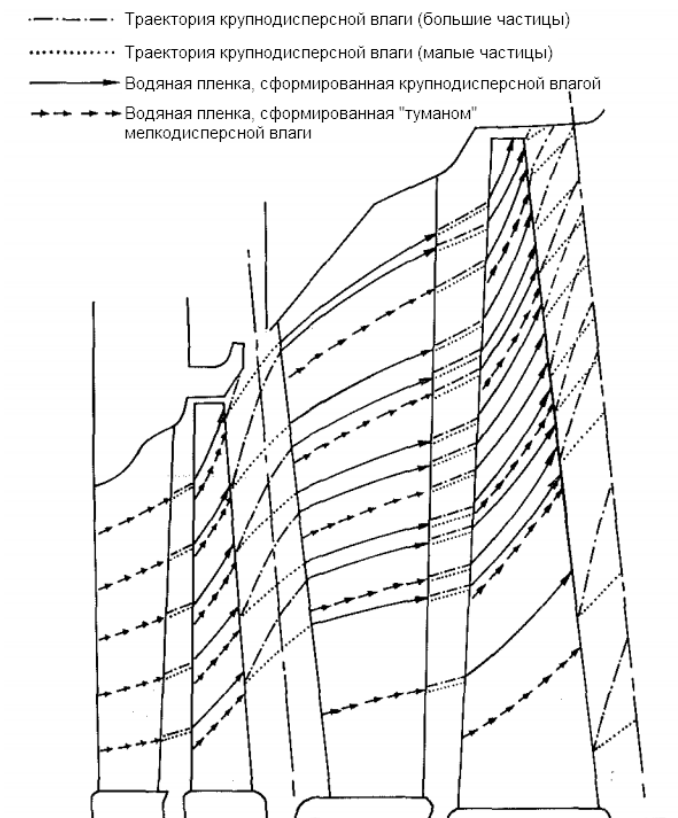


Рисунок 1.7.

Траектории капель в последней ступени паровой турбины [138]

Представленные данные описывают движение крупных капель среднего размера. Однако необходимо учитывать полидисперсный характер распределения диаметров дискретной среды, что является крайне затруднительным для экспериментальных исследований. Развитие вычислительных методов в последние годы позволило производить расчеты как двухмерных цилиндрических разверток ступеней, так и сквозное компьютерное моделирование влажнопаровых потоков в ЦНД паровых турбин [131, 139, 95, 130, 72]. На основе численного моделирования были получены определенные представления о характере движения крупных капель в межлопаточных зазорах последних ступеней. На Рисунке 1.8 представлены траектории крупнодисперсной влаги различных размеров. Меридиональный угол движения более крупных капель (например, 200 мкм) выше, чем для частиц, обладающих малыми размерами (например, 50 мкм), что вызвано воздействием центробежных сил. Подобное поведение крупной влаги при движении в последней ступени является следствием сложного полидисперсного состава жидкой фазы (см. Рисунок 1.5).

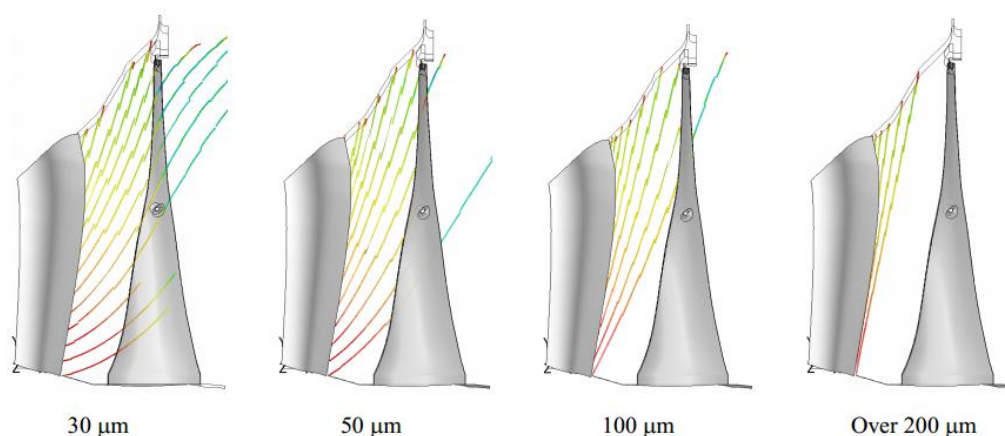


Рисунок 1.8.

Траектории крупных капель различных размеров в межлопаточном канале последней ступени [132]

Необходимо отметить, что в приведенных работах исследование движения крупных капель численным методом несет оценочный характер, так как

современные математические модели не могут в полной мере отражать процессы формирования крупных частиц в проточной части.

Краткое описание характера распределения крупнодисперсной влаги в проточной части паровой турбины, проведенное в данном разделе, подтверждает необходимость в подробном исследовании периферийных сечений сопловых и рабочих лопаток в условиях лабораторных испытаний, для выявления основных особенностей движения крупных капель. При этом важно поддерживать режимные параметры рабочей среды, близкие к реальным: числа Маха варьируются в диапазоне 0,5 – 2; числа Рейнольдса $2 \cdot 10^5 - 10^6$; степень влажности 0 – 15%; размеры капель 0,1 мкм – 500 мкм. Автор данной работы считает, что активные исследования движения крупных капель в потоке помогут в дальнейшем создавать эффективные методы борьбы с эрозионными процессами в проточных частях турбин.

1.2. Краткий обзор экспериментальных методов определения характеристик жидкой фазы

За время активного исследования влажнопаровых потоков, было разработано большое количество методик экспериментального измерения характеристик жидкой фазы. Для построения картины движения дискретных частиц в потоке наибольший интерес представляют собой скоростные характеристики капель (скорость и направление движения), а также их размеры. Представленные в настоящем разделе методы исследования использовались для выявления особенностей течения двухфазных потоков, которые будут описаны в разделе 1.3. Их основной особенностью является то, что они определяют параметры жидкой фазы в узкой пространственной области, что позволяет говорить о характеристиках капель в точке.

1.2.1. Определение размеров капель

По принципу действия методы измерения параметров жидкой фазы можно разделить на 3 группы: механические, оптические и электрические. Наиболее простыми считаются механические методы, принцип работы которых заключается в улавливании самих капель или отпечатков. В первом случае

происходит консервация частиц жидкой фазы в слое масла, после чего распределение диаметров определяется в оптическом поле микроскопа. Метод отпечатков с использованием, например, сажевого покрытия также применяется для измерений среднего размера капель. Этот метод требует отбора проб на пробное стекло, покрытое слоем сажи. Внедрение капель в слой сажи, как известно, приводит к появлению отпечатка, размер которого связан с размером капли. Механические методы измерения размеров капель позволяют достаточно точно изучать дисперсный состав жидкой фазы во влажнопаровом потоке. Однако данные методики применимы только до определенного значения скоростей течения. При величинах чисел Маха $M_{It} > 0,7$ происходит сдувание слоя масла или сажи с поверхности площадки щупа, что не позволяет применять эти методы в подобных условиях. Кроме того, необходимость в непосредственном введении зонда отпечатков в поток, приводит к аэродинамическому воздействию на течение основной фазы, что необходимо учитывать при обработке экспериментальных данных.

Наибольшее распространение при исследовании характеристик жидкой фазы получили оптические методы. На данный момент они являются наиболее перспективными, так как их газодинамическое воздействие на поток минимально, а развитие цифрового оптического оборудования позволяет адаптировать их к различным условиям. На кафедре ПГТ в МЭИ широкое распространение получили следующие оптические методы измерения дисперсного состава капель:

1. Метод асимметрии индикатрисы рассеивания. Применяется для измерения частиц жидкости, размеры которых лежат в диапазоне: $1,2 \cdot 10^{-8}$ м - $0,8 \cdot 10^{-6}$ м.
2. Метод малых углов. Применяется для измерения частиц жидкости, размеры которых лежат в диапазоне: $5 \cdot 10^{-6}$ м - 10^{-4} м.
3. Метод полной индикатрисы. Применяется для измерения частиц жидкости, размеры которых лежат в диапазоне: 10^{-6} м - 10^{-5} м.

Эти методы основаны на эффекте рассеивания и ослабления света, проходящего через мутную среду. При падении светового луча на отдельную

частицу или элементарный объем среды с взвешенными в нем частицами, каждая частица становится вторичным источником света, посылая рассеянный свет по всем направлениям пространства. Кривая, характеризующая распределение света по всем направлениям, называется индикатрисой рассеяния света (см. Рисунок 1.9). Степень асимметрии индикатрисы может служить для определения размера капель.

На Рисунке 1.10 представлена схема оптического зонда, применяемого для реализации метода асимметрии индикатрисы рассеивания (для определения модальных размеров мелкодисперсных капель). Подобная конструкция была разработана в МЭИ Куршаковым А. В., Никольским А. И. [31].

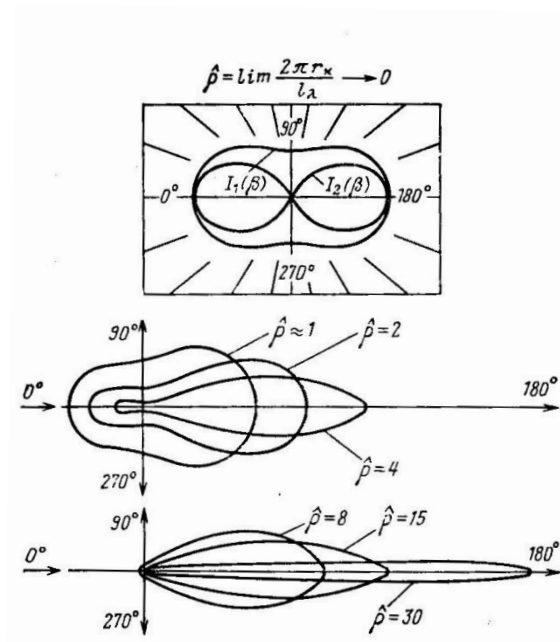


Рисунок 1.9.

Индикатрисы рассеяния для капель воды различных размеров

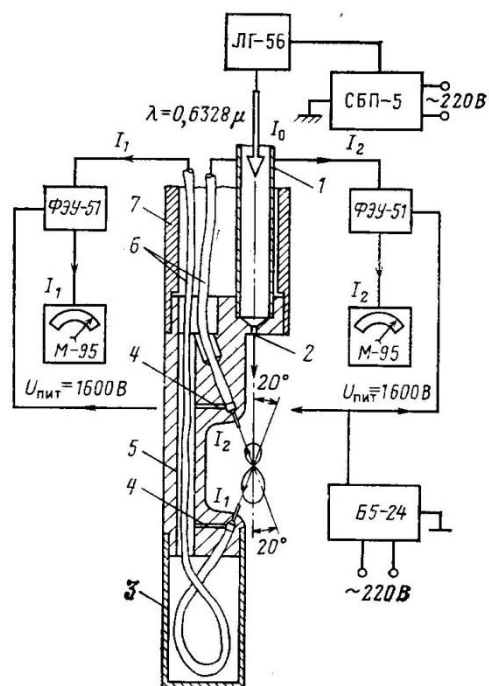


Рисунок 1.10.

Схема оптического зонда для измерения мелких частиц методом асимметрии индикатрисы рассеивания

Лазер ЛГ-56 дает пучок света с длиной волны 0,6328 мкм. Фотометрирование интенсивности излучения рассеянного света под углом 20° осуществляется фотоэлектронным умножителем.

Для определения дисперсного состава крупных капель используется метод малых углов, разработанный Шифриным К.С. и Голиковым В. И. [30]. Принципиальная схема оптического зонда, разработанного Куршаковым А. В., отображена на Рисунке 1.11. Световой поток (показан стрелкой) от источника света (лазера) попадает в просвечиваемый объем. Рассеянный в этом объеме свет попадает на зеркало (1). Индикатриса рассеяния регистрируется с помощью световода (3), который направляет его на фотоумножитель. Преимущество зонда состоит в том, что он обеспечивает достоверную информацию о крупных частицах при работе в широком диапазоне давлений [31]. Развитие оптических методов измерения дисперсного состава жидкой фазы позволило активно использовать их при исследовании двухфазных потоков в проточных частях

паровых турбин. В [125] определены средние размеры дискретных частиц в последней ступени экспериментальной модельной турбины, а в [136] доработанный оптический зонд позволил определить как дисперсный состав крупных капель в потоке, так и их скорость и концентрацию.

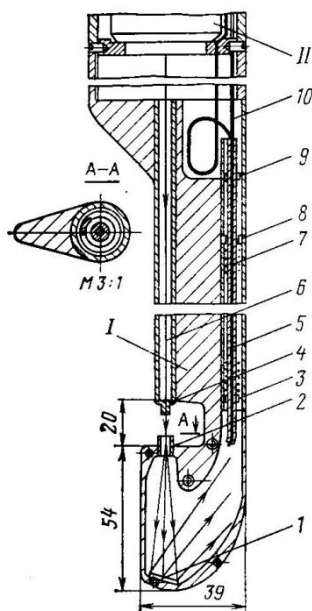


Рисунок 1.11.

Схема оптического зонда для измерения крупных частиц методом малоуглового рассеяния света

1.2.2. Определение скоростей капель

В двухфазных течениях, включающих светорассеивающие частицы, эффективно используется лазерная доплеровская анемометрия – бесконтактный метод измерения скорости движения жидкой фазы [31]. Оптическая диагностика двухфазных сред использует лазерные доплеровские анемометры по дифференциальной схеме (ЛДА) и лазерные решеточные анемометры (ЛРА). Для ЛРА не требуется когерентного источника света, поэтому данная установка имеет более простую оптическую схему, однако результаты применения ЛДА менее «зашумлены». На Рисунке 1.12 представлен принцип действия ЛДА. Луч лазера (1) расщепляется в узле (2) на два пучка одинаковой интенсивности, сходящихся в точке А канала, где вдоль оси х движутся капли. Свет, рассеянный вдоль оси у, собирается объективом 3 на поверхность катода фотоприемника 5. В точке

пересечения лучей (А) возникает пространственная синусоидальная интерференционная решетка, при пролете светорассеивающей частицы с конечной скоростью (c_k), возникает модуляция рассеянного каплей света с доплеровской частотой, напрямую пропорциональной величине c_k .

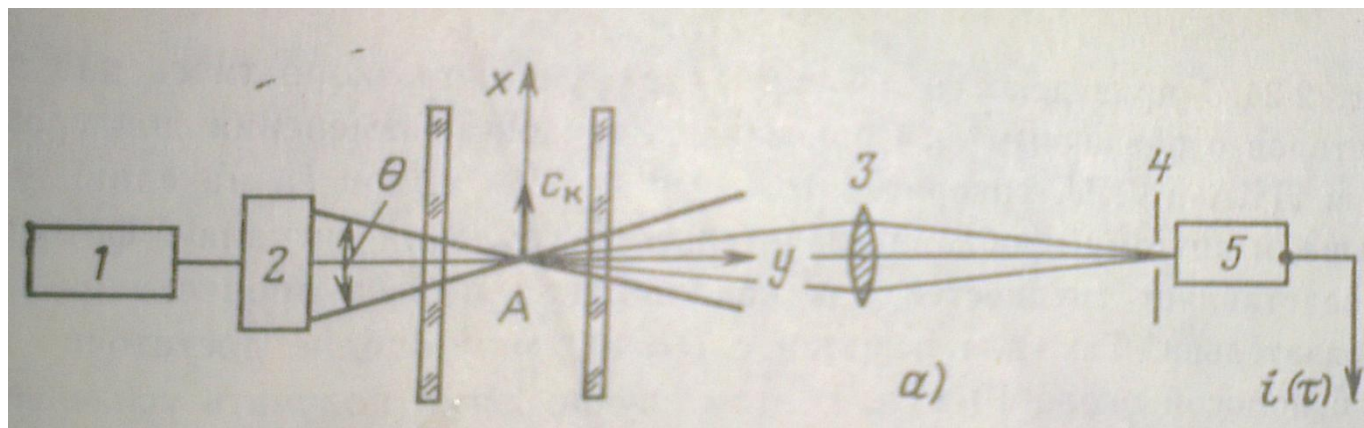


Рисунок 1.12.

Схема ЛДА

Схема ЛРА изображена на Рисунке 1.13. Луч лазера 1 фокусируется линзой 2 в некоторой точке А потока. Изображение этих объективом 3 переносится на плоскость решетки – модулятора 4, расположенного на катоде фотоприемника 5.

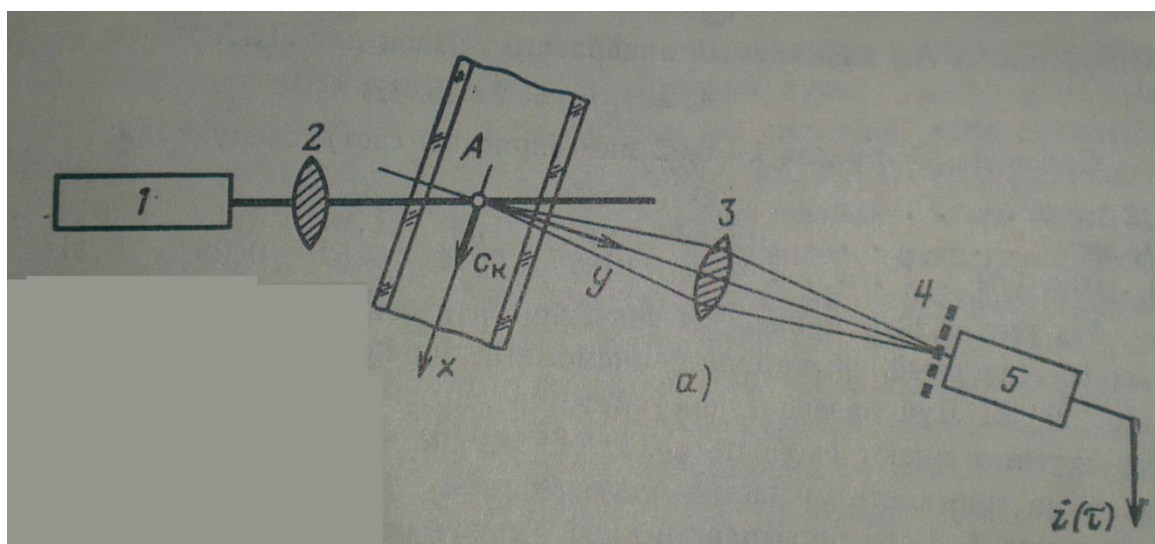


Рисунок 1.13.

Схема ЛРА

Лазерная анемометрия используется для определения скорости, угла направления и турбулентности частиц жидкой фазы. Однако в связи с большим

пространственным разрешением, устойчивая работа ЛДА и ЛРА возможна при малой массовой концентрации жидкой фазы – около 1% [31].

1.3. Структура капельной среды за сопловыми решетками турбины

1.3.1. Области проявления эрозионно-опасной влаги за сопловой решеткой

Экспериментальные исследования [33, 26, 81, 37, 25], проведенные на кафедре ПГТ МЭИ, позволяют построить достаточно подробную модель структуры парокapельных потоков в сопловых решетках турбин. Исследования структуры капельных потоков в межлопаточных каналах и межлопаточных зазорах проведены в работе [15]. При $y_0 > 0$ (y_0 – начальная влажность пара перед решеткой) в межлопаточном канале формируется несколько характерных потоков влаги различных размеров. Их схематическое изображение представлено на Рисунке 1.14.

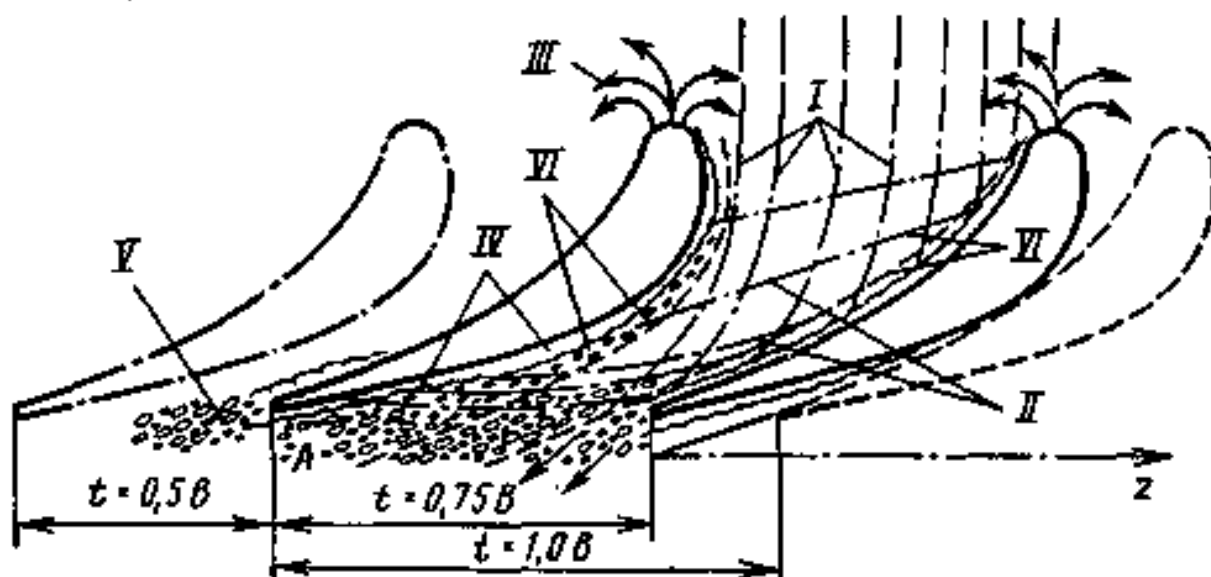


Рисунок 1.14.

Схема течения влажного пара в сопловой решетке

I – поток первичной влаги, проходящей канал без контакта с его поверхностью; II – капли, отраженные вогнутой поверхностью, выбитые первичными каплями или сорванные с пленки на вогнутой поверхности паровым потоком; III – капли, отраженные входной кромкой, сорванные и выбитые из

пленки на входном участке профиля; IV – капли, образовавшиеся из пленки на конфузормом и диффузормом участках спинки в косом срезе; V – капли, образовавшиеся при дроблении пленки, стекающей с выходных кромок лопаток; VI – паракапельный пограничный слой над пленками, характеризующийся интенсивным перемещением частиц разных размеров в пленку и ядро потока. Важно подчеркнуть, что все вышеперечисленные потоки дискретной фазы являются эрозионно-опасными [7].

В работе [15] подробно рассмотрен дисперсный состав влаги в сечении за сопловой решеткой. Диаметры частиц определялись с помощью специально разработанного зонда, используемого при небольших дозвуковых скоростях. Принцип работы заключается в инерционном осаждении капель на покрытую вязким слоем пластину. Полученные отпечатки капель фотографировались и обрабатывались. На Рисунке 1.15 представлены результаты экспериментального исследования структуры двухфазного потока в разных точках вдоль плоскости выходных кромок сопловой решетки С-9012А. На входе перед решеткой массовый модальный размер капель был несколько больше 55 мкм. Из Рисунка видно, что в разных точках наблюдаются многопиковые характеристики. Это объясняется прежде всего наличием нескольких источников образования капель различного размера, описанных выше. Естественно, что в результате каждого из этих процессов образуются частицы своего характерного размера, который зависит от конкретных условий в области их возникновения. Как видно из представленного Рисунка, наиболее крупные дискретные частицы движутся за выходной кромкой лопатки ($\bar{z} = 0$) – их модальный диаметр превышает 200 мкм. Полнота картины будет не полной без рассмотрения распределения средних размеров (среднемассовых) частиц вдоль шага при различных значениях начальной влажности пара (см. Рисунок 1.16). Как видно из представленных данных, четкая по дисперсности граница кромочного следа имеет место только со стороны спинки профиля лопатки.

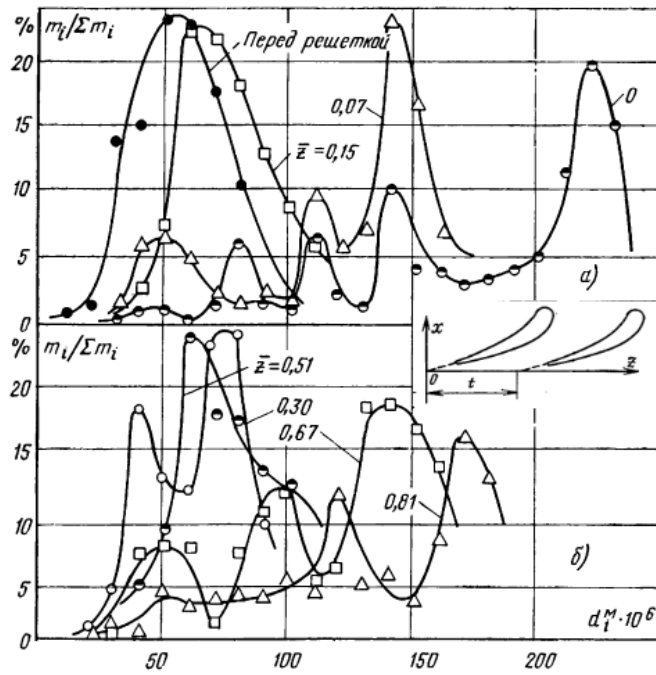


Рисунок 1.15.

Дисперсность влаги за сопловой решеткой. а,б – зависимость $m_i/\Sigma m_i$ от модального диаметра капель по шагу сопловой решетки ($x = x/t = 0,1$; $y_0 = 2,5\%$;

$$M_{1t} = 0,7)$$

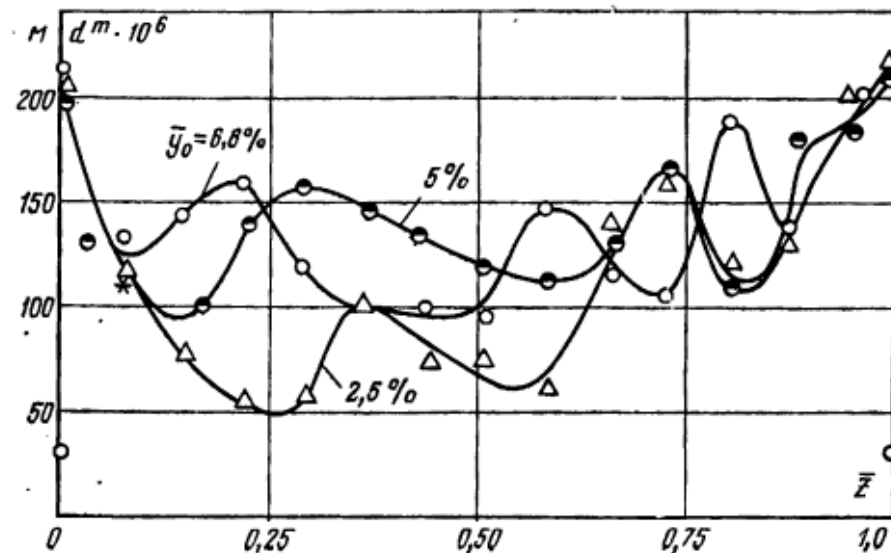


Рисунок 1.16.

Распределение средних размеров капель за сопловой решеткой вдоль шага при различных значениях начальной влажности пара

Измерения показали также наличие крупных капель в ядре потока примерно на расстоянии $\bar{z} = 0,2 - 0,35$ от кромочного следа со стороны спинки лопатки. Возникновение крупнодисперсной влаги в ядре потока объясняется отрывом пленок с поверхностей лопатки и дроблением (рекошетированием) капель влаги при соприкосновении со смоченной поверхностью лопатки. В решетках большого шага наблюдается также срыв крупных капель с участка максимальной кривизны поверхности спинки лопатки [31]. При анализе структуры капельных потоков за решеткой важно учитывать их взаимодействие между собой [21].

В работе [25] был определен средний модальный диаметр крупнодисперсной влаги, формирующейся в межлопаточном сопловом канале и за ним. Так размеры капель, образованных за счет срыва и уноса с поверхности пленки составляют 100-150 мкм; размеры отраженных частиц соответствуют диаметрам капель перед исследуемой решеткой. Самыми крупными, как отмечалось выше, являются частицы дискретной фазы, образовавшиеся за счет срыва водяной пленки с выходной кромки (более 200 мкм) и в результате диффузорного срыва с выпуклой поверхности профиля (170 – 200 мкм).

В работах [42, 41] результаты исследования качественно совпадают с приведенными данными только в области кромочного следа, что в первую очередь связано с различиями в подготовке парокапельной среды и в геометрических характеристиках канала.

Приведенные данные о структуре капельного потока в межлопаточном канале сопловых решеток и за ним основываются на измерении дисперсного состава крупной влаги. Таким образом, можно сказать, что схема, изображенная на Рисунке 1.14, была получена неявным образом, то есть по косвенным признакам проявления источников крупнодисперсных капель на распределениях размеров дискретной среды. Определенный интерес представляет собой визуальный анализ структуры капельного потока, который позволяет довольно подробно исследовать характер течения дискретной фазы. По результатам работы [89], в котором решалась данная задача, была получена картина движения влаги, представленная на Рисунке 1.17.

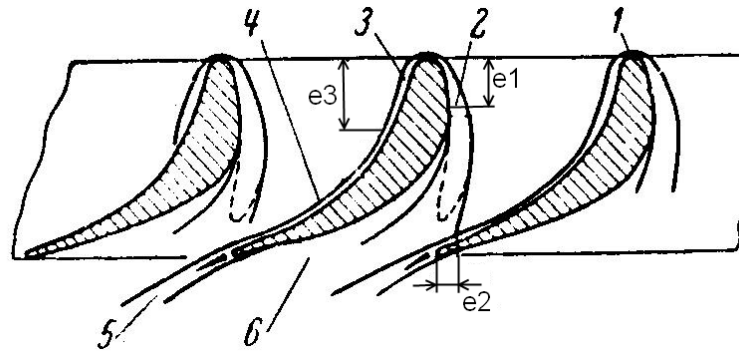


Рисунок 1.17.

Картина течения влажного пара в каналах сопловой решетки. 1 – передний капельный подслой; 2, 3 – передние кромочные следы; 4 – бинарный слой; 5 – кромочный след; 6 – ядро потока

Капли влаги, сталкиваясь с входной кромкой лопатки, дают начало переднему капельному подслою (1). Передний кромочный след со стороны выпуклой поверхности профиля (2) отрывается на расстоянии $e_1 = 0,2b$ (где b – хорда лопатки) от входной кромки. Частично влага из следа попадает на вогнутую поверхность на участке $e_2 = 0 - 0,005b$. Передний след со стороны вогнутой поверхности профиля (3), наибольшая толщина которого достигала порядка $0,05b$, на расстоянии $e_2 = 0,25b$ от входной кромки становится более тонким и переходит в капельный подслой бинарного слоя (4), текущего по вогнутой поверхности лопатки. Важно отметить, что представленный анализ несет оценочный характер, так как производилось только визуальное наблюдение за движением частиц жидкой фазы без подробного анализа их дисперсного состава.

Представленные данные показывают, что интенсивность проявления тех или иных потоков течения крупнодисперсной влаги во многом зависит от геометрических параметров решетки [4] и режимов течения [81].

Анализируя результаты опытных исследований, следует учитывать абсолютные значения и диапазоны изменения наиболее важных критериев подобия, являющихся одновременно режимными параметрами проточной части [22] – начальная влажность (y_0), теоретическое число Маха за решеткой (M_{1t}), отношение плотностей фаз ($\bar{\rho}$), и так далее. Безусловно, для более подробного

исследования влажнопаровых потоков необходимо учитывать и другие параметры течения [30].

1.3.2. Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой турбины

Вопрос влияния режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой затрагивается в большом количестве экспериментальных и исследовательских работ [26, 75, 32, 33, 24, 85, 61]. В [21, 30, 31] эти данные обобщены и систематизированы. Важной характеристикой движения жидкой фазы является коэффициент скольжения $\nu = c_k/c_p$ (где c_k - скорость капель; c_p - скорость паровой фазы). Данная величина, помимо скоростных параметров жидкой фазы, «отслеживает» изменение дисперсного состава крупнодисперсной влаги – крупные капли, которые более инертные, имеют заниженные значения ν , в то время как частицы малых диаметров увлекаются основным потоком и разгоняются заметно быстрее [31].

На Рисунке 1.18 представлены распределения коэффициентов скольжения $\nu = c_k/c_p$ (где c_k - скорость капель; c_p - скорость паровой фазы). Важно отметить, что в исследуемой решетке практически отсутствует «аэродинамическая тень», что позволяет некоторым потокам крупных капель перемещаться в межлопаточном канале без контакта со стенками лопаток. Как видно из представленных данных, максимальные скорости имеют капли в ядре потока, а минимальные в кромочном следе. Автор диссертации хотел бы указать на существенно низкие значения коэффициентов скольжения, определенных экспериментально.

С увеличением теоретического числа Маха за решеткой (см. Рисунок 1.18, а) коэффициенты скольжения в ядре потока уменьшаются, а в зонах крупнодисперсной влаги - увеличиваются в связи с интенсификацией процессов дробления.

Влияние числа Рейнольдса также велико (см. Рисунок 1.18, б). С ростом Re , которое изменялось путем регулирования давления полного торможения потока

перед исследуемым объектом, значения коэффициентов скольжения растут во всех точках поля, при этом увеличение Re способствует уменьшению размеров капель. Стоит отметить, что значительное влияние этого параметра в первую очередь связано с изменением плотности несущей фазы.

Увеличение плотности несущей фазы, проявляющееся через параметр $\bar{\rho} = \rho_k / \rho_n$ (где ρ_k - плотность жидкости; ρ_n - плотность паровой фазы), как видно из Рисунка 1.18, г, приводит к существенному росту коэффициентов скольжения капель в ядре потока.

Помимо распределений коэффициентов скольжения вдоль шага за решеткой важно иметь информацию о средних значениях ν в рамках одномерного подхода [31]. На Рисунке 1.19 представлена зависимость среднего значения коэффициентов скольжения в зависимости от удаления от выходной кромки канала и некоторых режимных параметров [81].

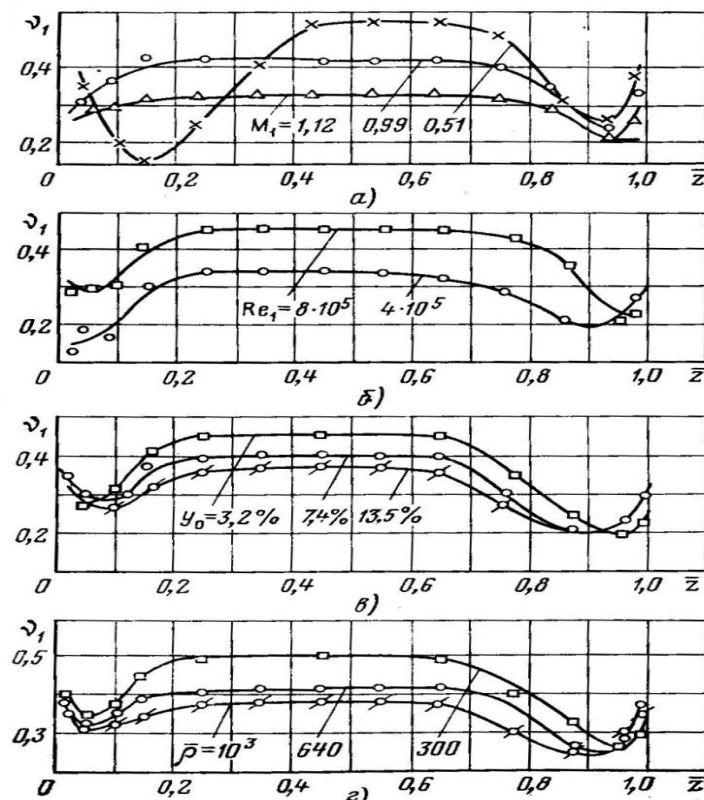


Рисунок 1.18.

Влияние чисел Маха (а), Рейнольдса (б), влажности (в) и отношения плотностей (г) на распределение коэффициентов скольжения по шагу за сопловой решеткой типа С-90-15Б [81]

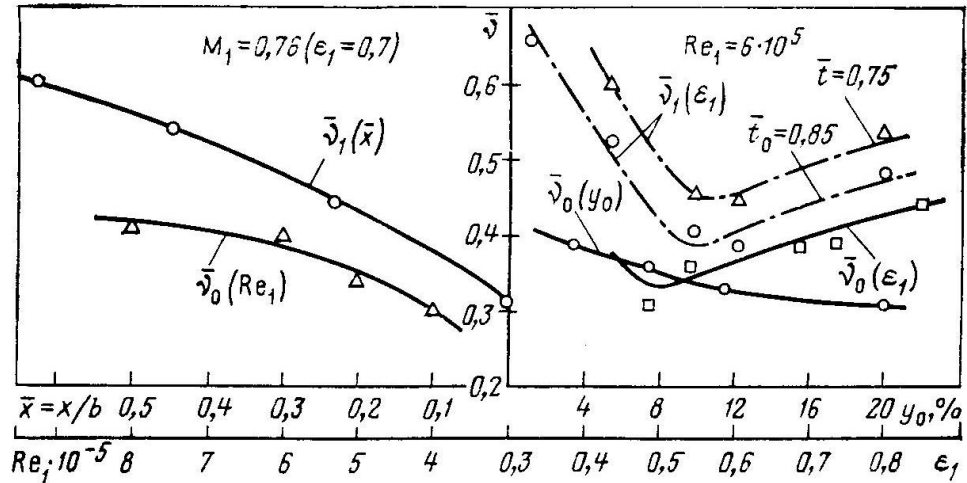


Рисунок 1.19.

Осредненные коэффициенты скольжения за сопловой решеткой в зависимости от режимных и некоторых геометрических параметров и расстояния от решетки

При увеличении осевого расстояния коэффициенты скольжения растут, что говорит о разгоне крупнодисперсной влаги основным потоком, затем, по мере достижения некоторого расстояния от выходной кромки, влияние зазора ослабевает в соответствии с проявлением эффектов коагуляции капель.

Помимо скоростных характеристик, режимные параметры течения существенно влияют и на дисперсный состав крупнодисперсной влаги. На Рисунке 1.20 отображены распределения среднемассовых диаметров капель, полученных в результате различных исследований и обобщенных в [21].

С ростом начальной влажности пара средние размеры частиц увеличиваются вдоль всего шага решетки (см. Рисунок 1.20, а). Важно отметить, что при малых значениях y_0 характер распределения диаметров несколько иной. В первую очередь это связано с отсутствием сформированной водяной пленки на стенках межлопаточного канала. Дальнейшее повышение начальной влажности приводит к установлению характерного распределения диаметров капель за решеткой.

Влияние чисел Маха и Рейнольдса (см. Рисунки 1.20, б, в) также существенно на дисперсный состав жидкой фазы за решеткой. В данном случае

это связано с механическим взаимодействием основного потока и дискретными частицами: процессами дробления и разгона инертных капель. Происходит изменение аэродинамического сопротивления капель [82], характера волнового движения на поверхности пленки [78], интенсивности процессов уноса и срыва частиц [64]. Кроме того, с изменением этих режимных параметров меняются структура и характеристики пограничного слоя.

В обобщающих работах [21, 80, 30, 31] указывается на то, что основным источником крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой является водяная пленка на поверхностях лопаток, а также процессы, связанные с ней.

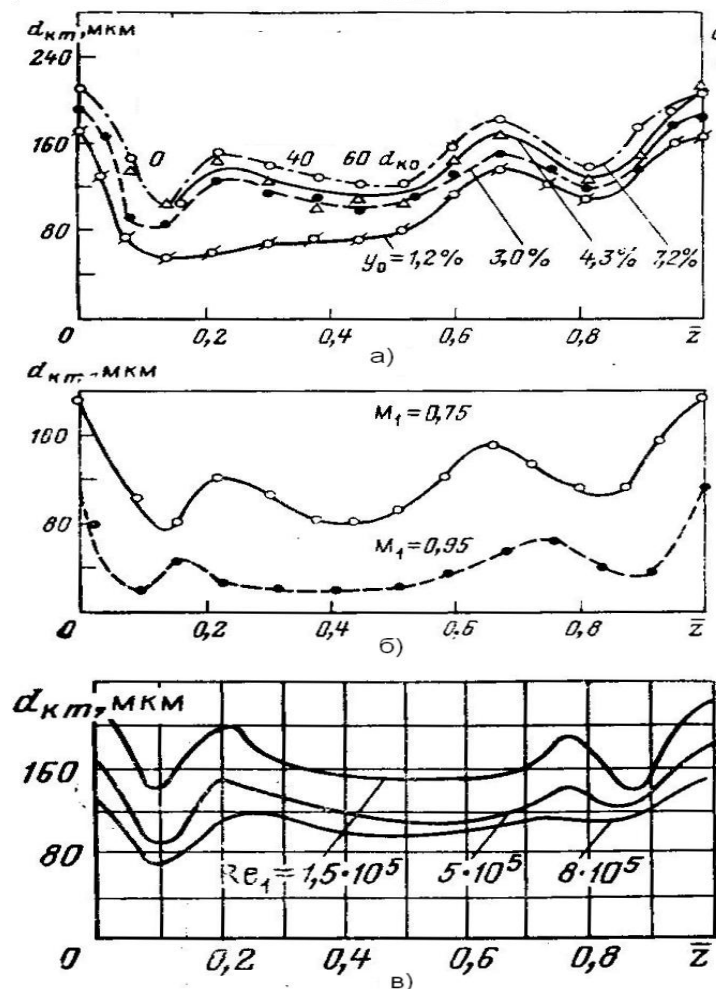


Рисунок 1.20.

Влияние некоторых режимных параметров на дисперсный состав жидкой фазы. а: от начальной влажности пара; б: от теоретического числа Маха; в: от числа Рейнольдса

1.3.3. Характер течения водяной пленки на поверхностях лопатки

Процесс формирования водяной пленки на поверхности, ограничивающей межлопаточный канал, связан с инерционным осаждением дискретных частиц жидкости на стенках профилей [80]. Это в первую очередь касается течения в условиях, характерных для последних ступеней ЦНД турбины. На Рисунке 1.21 приведены приближенные данные о доли капель различных размеров, оседающих на профили решетки [75]. Более подробный анализ движения крупных капель в межлопаточном канале будет показан в следующем разделе.

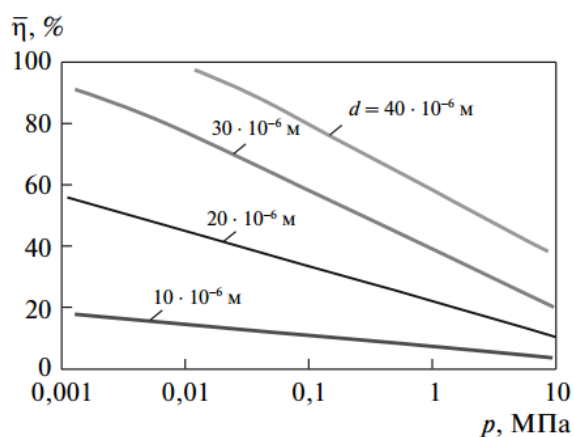


Рисунок 1.21.

Влияние давления пара p и размера капель d_k на долю капель η , оседающих на лопатках

Важно отметить, что представленные на Рисунке 1.21 данные были получены с использованием ряда допущений, которые не всегда выполняются в условиях течения влажно парового потока. Однако четко наблюдается тенденция, которая показывает, что капли больших размеров, вследствие своей инертности существенно отклоняются от линий тока основного потока и оседают на поверхностях межлопаточного канала. Опыты по сепарации влаги со стенок соплового канала [27, 28] показывают, что по поверхностям лопаток движется в виде пленки только часть выпавшей жидкости, а ее другая часть возвращается в паровой поток процессами срыва и «отражения» [26]. В общем случае срыв и унос жидкости из пленки может быть связан со срывом и капель с гребней

теряющих устойчивость капиллярных волн [65, 30] и процессами, отображенными на Рисунке 1.14. Стоит отметить, что явления срыва и отражения капель с поверхности пленки представляют собой достаточно сложные процессы. Их особенности достаточно подробно рассмотрены в [81]. Образование пленки сопровождается отражением обратно в газовый поток некоторого числа частиц жидкости. Интенсивность отражения будет расти с увеличением толщины пленки. При достижении критического объемного расхода пленки $q_{кр}^v$ наступает срыв капель с ее поверхности, связанный с образованием волновых явлений на поверхности раздела бинарного подслоя жидкости и парокapельного подслоя. Наконец, при дальнейшем росте объемного расхода, достигается режим течения $q_{пр}^v$, при котором количество сорванных и отраженных капель уравнивается количеством осевших на пленку. В результате толщина и расход в пленке дальше не увеличиваются. В случаях высоких локальных скоростей пара и больших значений градиентов давления, что характерно для сопловых решеток последних ступеней турбин, можно считать, что $q_{кр}^v = q_{пр}^v$ [24]. Опыты показывают, что предельная пропускная способность пленки в любом сечении профиля сопловой лопатки является практически однозначной функцией локальных значений градиента давления, напряжений трения от парового потока, физических параметров жидкости. Дисперсный состав сорванных частиц влаги, движущихся в узком газокapельном слое, имеет двухпиковую структуру при малых значениях скоростей пара (см. Рисунок 1.22 кривые $M = 0,29 - 0,38$) и однопиковую при больших значениях (см. Рисунок 1.22 кривая $M = 0,66$) [26].

В работе [107] указывается, что существенное влияние на интенсивность отражения капель имеет толщина пленки (δ_n). Коэффициент отражения $\beta = G_{отр}/G_{вып}$ ($G_{отр}$ - расход отраженных капель; $G_{вып}$ - расход осевших на пленку капель) быстро увеличивается с ростом δ_n . Максимальная интенсивность отражения имеет место в зонах наименьших скоростей пара, где коэффициенты β могут достигать больших значений [26]. Авторы этой работы определили по данным расходных измерений в пленке и расчетам сепарации жидкости на

стенках канала величину коэффициента β и величины $\gamma = G_{\text{сор}}/G_{\text{вып}}$ (где $G_{\text{сор}}$ - расход сорванной с поверхности пленки влаги) при различной начальной влажности пара (см. Рисунок 1.23).

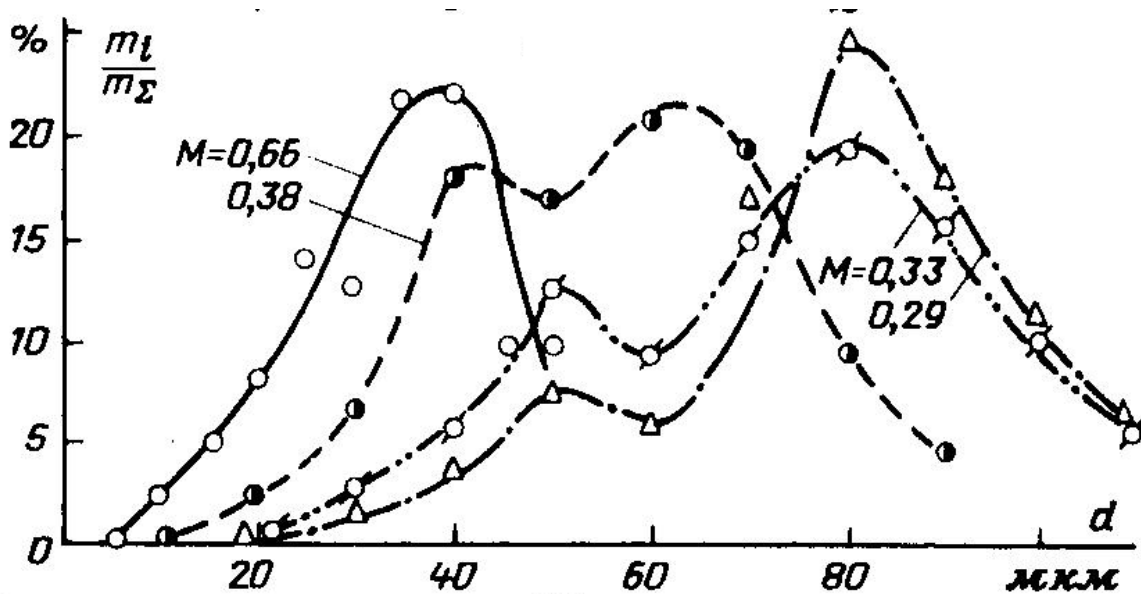


Рисунок 1.22.

Массовые спектры капель, сорванных с поверхности пленки при различных значениях скорости спутного потока

С появлением срыва с поверхности пленки коэффициент β по участку 0 – 6 составляет около 0,38, а по участку 0 – 7 около 0,67. В сопловых решетках с малым значением угла выхода потока отраженная и сорванная влага с вогнутой поверхности может быть источником образования пленки на спинке профиля, область которой расположена в аэродинамической тени по отношению к траекториям исходных частиц влаги. Как показано в [18] расход в ней более чем в 5 раз меньше, чем на вогнутой стороне профиля. Эти данные подтверждаются визуальными наблюдениями в натурной турбине, проведенными в работе [131]. На Рисунке 1.24 представлена картина течения пленки на спинке сопловой лопатки последней ступени. Потoki жидкости на поверхности профиля представляют собой отдельные струйки, которые формируют сплошную водяную пленку только вблизи выходной кромки.

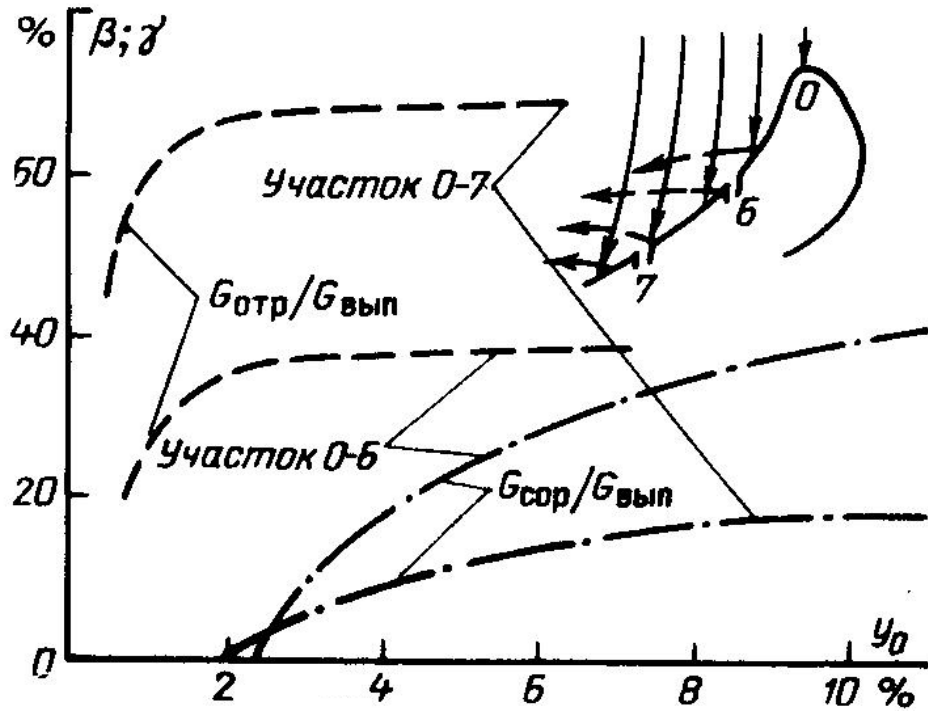


Рисунок 1.23.

Отражение влаги в сопловом канале

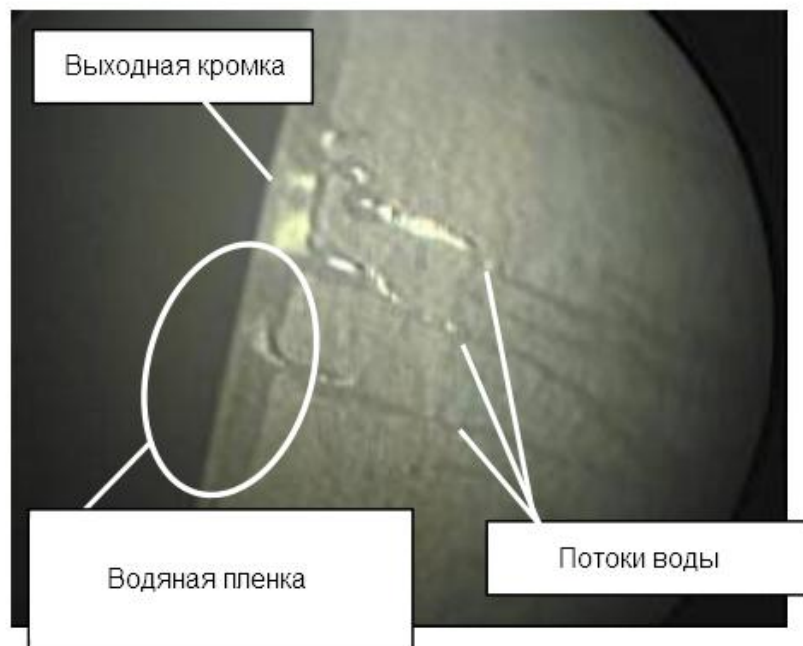


Рисунок 1.24.

Потоки воды на спинке сопловой лопатки

Волновой характер течения пленки, с которым в первую очередь связаны выше описанные процессы срыва и отражения капель в межлопаточном канале,

подробно рассмотрен в [64]. Полученные данные показали, что в большинстве практически важных задач граница раздела в пограничном слое имеет сложную волновую структуру. В этих работах рассматривалось изменение конфигурации водяной пленки при различных параметрах течения потока. В частности рассматривалось влияние чисел Re пленки и газового потока:

$$Re_{пл} = \overline{u_2} \overline{h} \rho_2 \mu_2^{-1}; \quad (1.2)$$

$$Re_{xг} = u_{01} x \rho_1 \mu_1^{-1}, \quad (1.3)$$

где $\overline{u_2}, \overline{h}$ - средняя скорость и толщина пленки; u_{01} - скорость несущей фазы в ядре потока; индекс 1 относится к газовой, а 2 - к жидкой фазе. В зависимости от $Re_{пл}$, определяющего расход жидкости в пленке, и числа $Re_{xг}$ меняется форма, длина и высота волн на ее поверхности. Существует несколько характерных волновых структур на поверхности пленки. При весьма малых $Re_{xг}$ ее поверхность остается практически гладкой. С ростом $Re_{xг}$ на поверхности раздела образуются мелкие волны (рябь), быстро перестраивающиеся в плоские (двумерные) волны малой амплитуды и скорости движения. Дальнейшее увеличение $Re_{xг}$ приводит к появлению пространственных (трехмерных) волн, возникающих при разрушении двумерных волн. Они оказываются устойчивыми в большом диапазоне $Re_{xг}$ и $Re_{пл}$, однако при достижении больших $Re_{xг}$, характерных для трансзвукового и сверхзвукового течения, фиксируются шквальные срывные волны, скорости движения которых существенно возрастают. На этих режимах, как заключается в [30], и происходит срыв и унос в газовый поток полидисперсных частиц жидкости, изменяя тем самым его параметры в пристеночной области. Фотографии внешней поверхности пленки при различных числах Рейнольдса представлены на Рисунке 1.25.

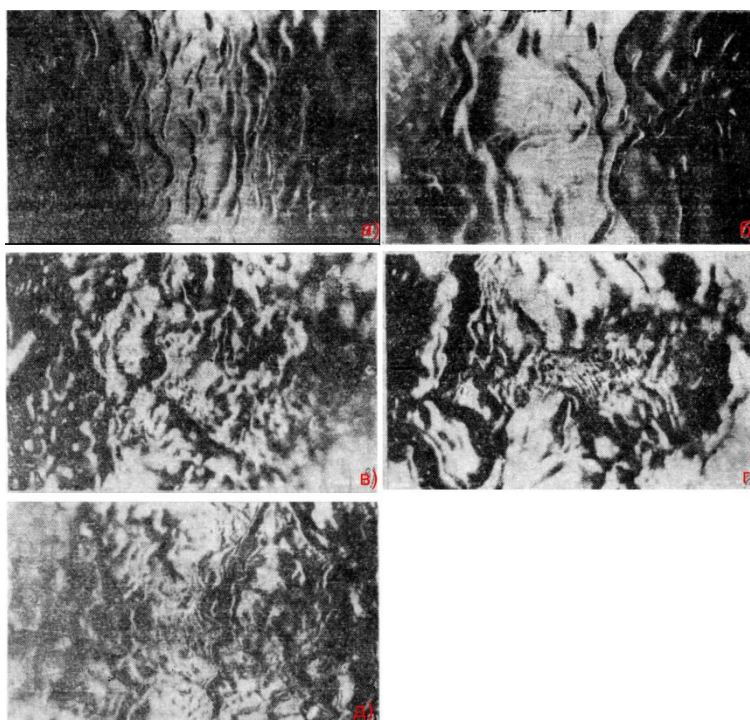


Рисунок 1.25.

Фотографии волновой поверхности пленки при различных числах Рейнольдса $Re_{\text{ХГ}}$ и $Re_{\text{ПЛ}}$. а: $Re_{\text{ХГ}}=5 \cdot 10^5$; б: $Re_{\text{ХГ}}=8,3 \cdot 10^5$; в: $Re_{\text{ХГ}}=10^6$; г: $Re_{\text{ХГ}}=1,33 \cdot 10^6$; д: $Re_{\text{ХГ}}=1,7 \cdot 10^6$; $Re_{\text{ПЛ}}=140$

1.3.4. Срыв водяной пленки с выходной кромки лопатки

Как отмечалось в разделе 1.3.1 наиболее крупные капли, формируемые за каналами сопловой решетки, располагаются в области кромочного следа. Их образование связано со сходом пленки с выходной кромки профиля и ее последующим дроблением паровым потоком. Вопрос механизма образования крупнодисперсной влаги в этой области довольно подробно рассматривался в ряде работ [2, 79, 45, 52, 14, 89].

Визуальный анализ дробления пленок влаги на сходе с кромки производился в работах [45, 2] с помощью высокоскоростных фотокамер. С кромки происходило пульсирующее стягивание в кромочный след и возвращение назад на лопатку пленки влаги. С набухшей пленки отделялся язычок влаги, который вытягивался вдоль кромочного следа, после чего от него отделялись дискретные частицы. Частота схода пленки с сопловой кромки в значительной

мере определялась начальной влажностью. С ее увеличением количество сходов в единицу времени росло, при этом характер схода оставался неизменным. Процесс срыва водяной пленки можно разделить на несколько этапов [45]:

1. Накопление пленки на поверхности вблизи выходной кромки.
2. Вытягивание язычка.
3. Дробление его головной части.
4. Стягивание оставшейся части язычка к кромке.
5. Разгон и дробление капли в кромочном следе.

Схематичное изображение полученных кадров представлено на Рисунке 1.26.

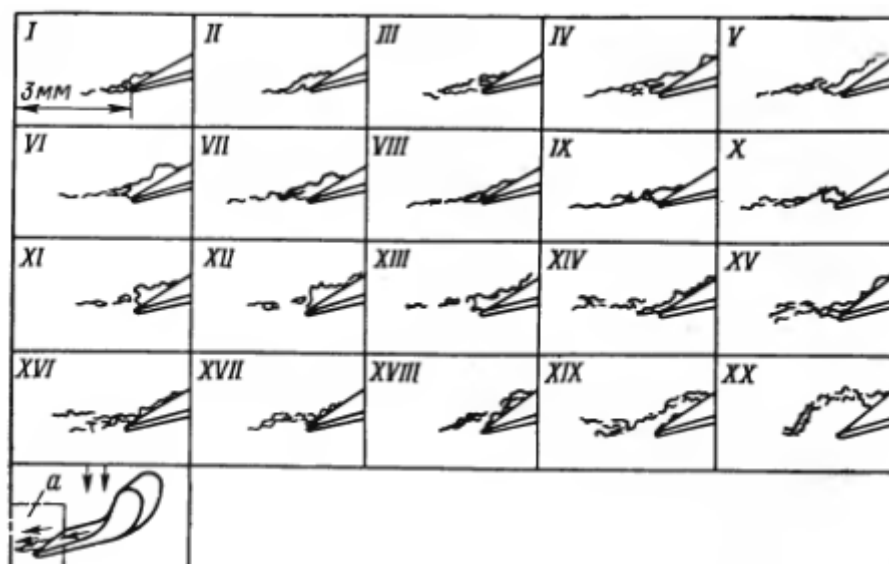


Рисунок 1.26.

Кинограммы процесса схода пленки с лопатки

При этом форма выходной кромки, как показано в [2] существенно влияет на механизмы образования крупнодисперсной влаги в кромочном следе. В случае кососрезанной выходной кромки водяная пленка сохраняет сплошность и после схода, причем средняя толщина пленки заметно возрастает в направлении движения. На некотором расстоянии с переднего фронта пленки вытягивается веер тонких струек жидкости, с которых срываются крупные капли, а сами струйки после отрыва головной части распадаются на более мелкие частицы

жидкой фазы. Автор [81] исследовал дисперсный состав крупнодисперсной влаги в зависимости от формы выходной кромки. Полученные данные приведены на Рисунке (см. Рисунок 1.27). С увеличением размера выходной кромки средние размеры капель, образовавшихся при срыве водяной пленки, уменьшаются, что благотворно сказывается на уменьшении интенсивности эрозионного износа входных кромок рабочих лопаток. Однако, увеличение размеров выходных кромок, в свою очередь, приводит к росту кромочных потерь паровой фазы вследствие ухудшения ее обтекания основным потоком [21]. Наличие подобных эффектов, которые исключают друг друга, требует решение задачи оптимизации для нахождения размеров выходной кромки. В [81] для сопловой решетки с профилями С-90-15А рекомендуется выбирать $\Delta_{кр} = 1,4 - 1,8$ мм.

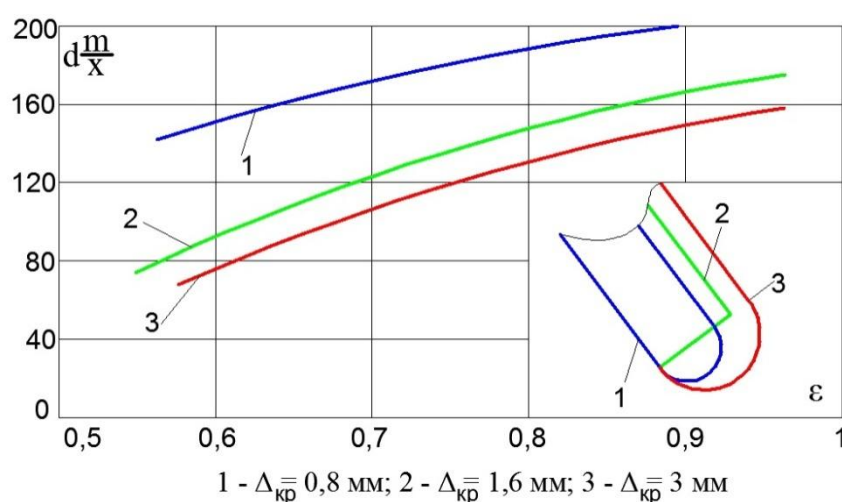


Рисунок 1.27.

Влияние толщины и конфигурации кромки на массовый спектр капель влаги в кромочном следе при начальной влажности $y_0 = 5\%$

Процесс схода водяной пленки с выходных кромок лопаток также приводит к изменению параметров паровой фазы в кромочной области. Подробные исследования в данном направлении были проведены в работах [14, 59, 1]. Рассматривались упрощенные экспериментальные модели в виде одиночных плоских пластин и решеток из них. Данные исследования позволили получить

представления об изменении структуры течения паровой фазы при появлении водяных пленок на стенках канала.

В рассмотренных моделях с различными геометрическими характеристиками выходных кромок выявлено изменение разряжения за кромкой $\bar{p}_{кр}$ при изменении начальной влажности пара (см. Рисунок 1.28). Величина $\bar{p}_{кр}$ определяется как [9]:

$$\bar{p}_{кр} = \frac{p_{кр} - p}{0,5\rho c^2}. \quad (1.4)$$

Величины, отмеченные в формуле (1.4), представлены на Рисунке 1.28. Опыты показали, что для плоскосрезанной и скругленной кромок разряжение с ростом влажности уменьшается, в то время как кососрезанная и двусторонне заостренная кромки оказались нечувствительны к изменению y_0 .

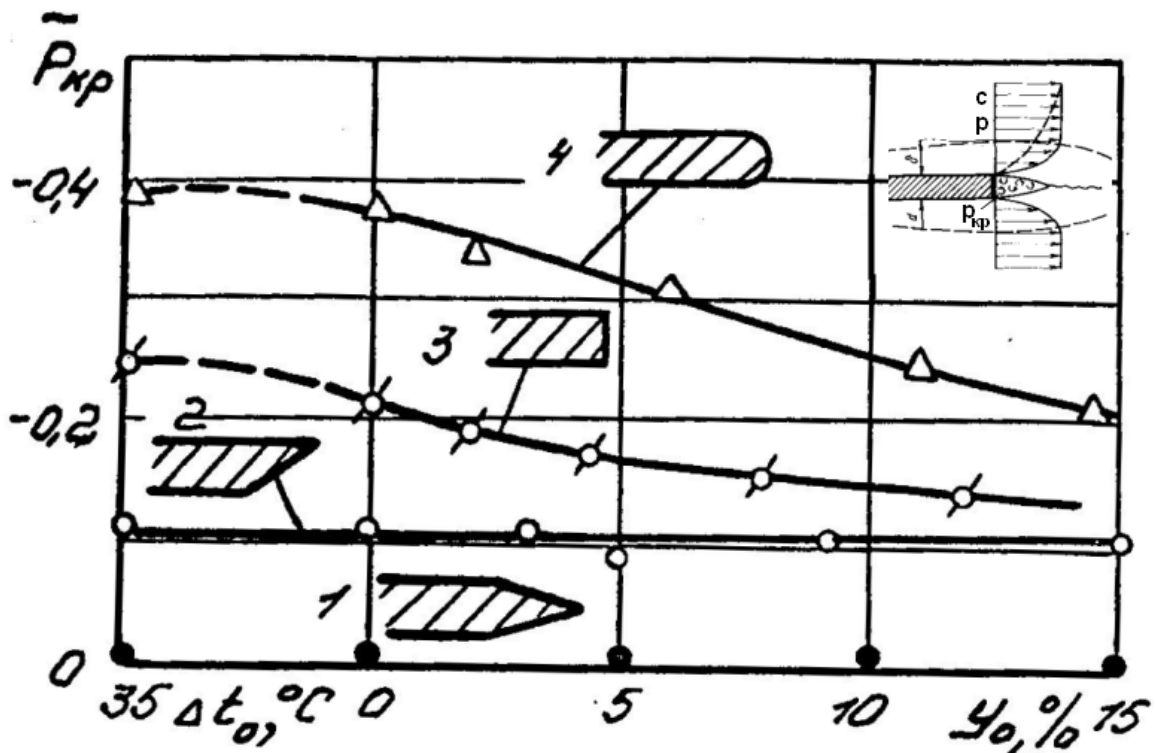


Рисунок 1.28.

Разряжение паровой фазы за кромкой при различной начальной влажности пара

Опыты [14] показали, что для рассмотрения структуры потока пара в кромочном следе, необходимо разделять характер движения в парокпельном слое вблизи стенки на 2 группы:

1. Парокапельный слой без пленки. В этом случае обтекание заостренных кромок при увеличении начальной влажности сопровождается расширением и углублением вихревых следов (увеличением разницы давления полного торможения непосредственно за кромкой и в основном потоке), а для плоскосрезанной и скругленной – к сужению [21]

2. Присутствие водяной пленки на поверхности. С ростом начальной влажности (и, как следствие, увеличением расхода в пленке), ширина и глубина кромочного следа для скругленной кромки начинает уменьшаться более интенсивно, чем в первом случае. Наблюдается существенный выигрыш при использовании скругленных выходных кромок по сравнению со срезанными.

Как отмечается в [2] полученный набор экспериментальных данных отчетливо подтверждает важную роль начального участка в процессах дробления и коагуляции капель. Наиболее полные данные об изменении средних размеров капель в кромочном следе были получены [14] на плоской пластине. Измерения производились вдоль оси пластины, результаты представлены на Рисунке 1.29

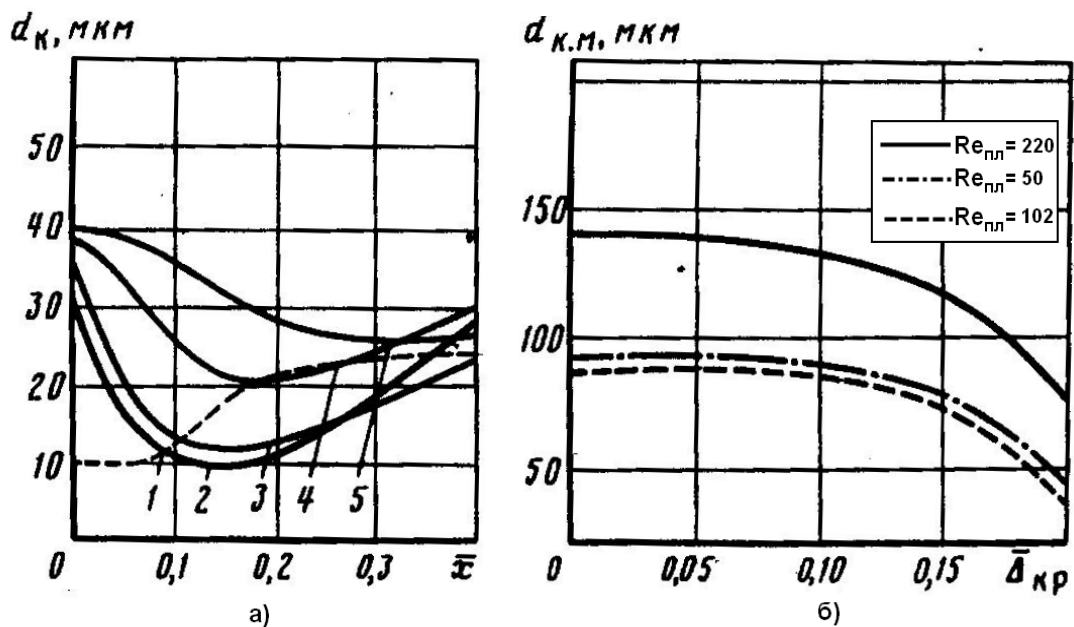


Рисунок 1.29.

Дисперсные характеристики капель в кромочном следе в зависимости от среза и степени влажности (а) и от толщины кромки (б). а) 1 – $y_0 = 1,3\%$; 2 – $y_0 = 7,3\%$; 3 – $y_0 = 11,1\%$; 4 – $y_0 = 16,2\%$; 5 – $y_0 = 17\%$;

При отсутствии водяной пленки на пластине среднемассовые размеры капель резко уменьшаются вдоль следа, а затем вновь возрастают (линия 1 – на Рисунке 1.29, а). С ростом начальной влажности при $y_0 = 5\%$ на поверхности пластины начинала образовываться тонкая пленка, в которой аккумулировалось определенное количество жидкости. Это приводит к увеличению средних размеров капель в потоке. При этом, как видно из Рисунка 1.29, а, область активного уменьшения диаметров, в которой происходит механическое разрушение капель, сменяется зоной роста средних размеров, что свидетельствует о начале процессов коагуляции.

Увеличение размеров капель за выходной кромкой с ростом начальной влажности напрямую связано с изменением расхода жидкой пленки. Это подтверждается Рисунком 1.29, б (в данном случае число Рейнольдса для пленки напрямую определяет ее массовый расход). Как видно из представленных данных, увеличение массового расхода в пленке (рост $Re_{пл}$) ведет к существенному изменению дисперсного состава жидкой фазы в закрюночной зоне. Кроме того, результаты исследования подтверждают описанные ранее данные о влиянии толщины выходной кромки на диаметры капель, образованных при дроблении пленки (см. Рисунок 1.29, б).

Приведенные в настоящем разделе данные о характере распределения крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой и о механизмах ее образования дают достаточно полное представление о характере движения крупных капель в межосевом зазоре турбинной ступени.

Однако, необходимо отметить, что течение многофазной среды зависит от большого количества геометрических и газодинамических параметров [30], которые определяют сложные механизмы взаимодействия фаз. Таким образом, проявление каждого из источников крупнодисперсной влаги в межлопаточном канале и за ним в полной мере зависит от условий течения полидисперсной среды.

1.4. Механика движения крупнодисперсной влаги в проточных частях турбомашин

Помимо знаний о характере распределения крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой, представляет значительный практический интерес изучение процессов движения инертной влаги в течении сплошной среды. Основной задачей подобного исследования является определение траекторий движения основных потоков капель в элементах проточных частей турбин. Подобные результаты должны в первую очередь определять особенности натекания крупных частиц в каналы рабочих решеток, а также выявлять основные места оседания влаги на поверхности межлопаточного канала сопловой решетки.

1.4.1. Силы, действующие на частицу в потоке газа

В целом (без учета процессов теплообмена между фазами), взаимодействие между каплями жидкости и паром носит механический характер [30]. Характер траекторий их распространения, механизмов разрушения и коагуляции определяется интенсивностью действующих на нее внешних сил.

На Рисунке 1.30 представлены силы, действующие на частичку влаги в неинерциальной системе отсчета, движущуюся в потоке [17].

$$\overline{\Delta c} = c_{\text{п}} - c_{\text{к}}, \quad (1.5)$$

где $c_{\text{п}}$ – скорость паровой фазы; $c_{\text{к}}$ – скорость частицы. Рассмотрены случаи, когда скорость пара больше скорости капли (см. Рисунок 1.30, а) и когда меньше (см. Рисунок 1.30, б). На Рисунке P_c – сила аэродинамического сопротивления, обусловленная обтеканием сплошной средой сферического объекта; силы инерции, обусловленные реакцией частицы на изменение скорости газовой среды: $P_{1и}, P_{к.и}$ (сила виртуальной массы, обусловленная ускорением несущей среды, увлекаемой каплей), $P_{кор}$ (кориолисова сила), $P_{т.и}$ (тангенциальная сила инерции); сила гравитационного воздействия P_g ; сила Магнуса P_m , обусловленная вращательным движением частицы с угловой скоростью ω . Кроме того имеет место сила, обусловленная наличием градиента давления основного потока.

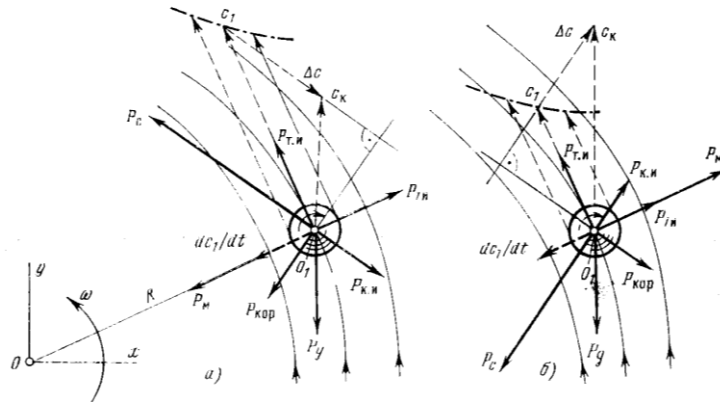


Рисунок 1.30.

Силы, действующие на сферическую твердую частицу

Как показано в [61], условия, при которых частица жидкости движется в последних ступенях паровых турбин, таковы, что всеми силами кроме силы аэродинамического сопротивления можно пренебречь. Однако некоторые авторы в своих исследованиях динамики движения инертных капель учитывают силу виртуальной присоединенной массы и силу, связанную с наличием градиентов давления [72].

Величина силы аэродинамического сопротивления определяется по формуле:

$$\vec{P}_a = \frac{1}{2} A_k C_x \rho_n |\vec{c}_n - \vec{c}_k| (\vec{c}_n - \vec{c}_k), \quad (1.6)$$

где A_k - площадь поперечного сечения капли; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, который в идеале учитывает деформацию капли (отклонение от сферической формы), тепло- и массоперенос в пограничном слое, развитие во времени пограничных слоев со стороны несущей фазы, внутрикапельную циркуляцию, нарастание во времени амплитуды вынужденных колебаний формы капли [30]. Многие из этих эффектов изучены в [134, 104, 55]. Однако на данный момент отсутствует достоверная картина влияния этих процессов на коэффициент сопротивления сферической капли.

Таким образом, при исследовании движения инертных капель используется классический закон сопротивления твердой сферической частицы, обтекаемой

несжимаемым изотермическим потоком газа [23]. В работах для стандартного коэффициента сопротивления вводятся поправки на сжимаемость основной среды, влияние нестационарности, турбулентности потока, температурного напора между фазами [8, 23, 39, 126].

1.4.2. Моделирование течения влажного пара

Для расчета процессов движения крупнодисперсной влаги (то есть решения уравнения 1.6) в элементах проточных частей турбомашин, необходимы знания о распределении параметров паровой фазы, входящих в уравнение 1.6. Экспериментальные данные о скалярных и векторных полях этих характеристик получить достаточно затруднительно, поэтому в данном случае, как правило, используются результаты математического моделирования течения сплошной среды в межлопаточных каналах. В ранних работах по этой тематике использовались графоаналитические методы с учетом сжимаемости среды [43], расчеты потенциальных течений перегретого пара [86]. В последнее время, с ростом вычислительных возможностей компьютеров, активно используются методы решения уравнений Эйлера и осредненных уравнений Навье – Стокса, описывающих течения сплошной среды [61, 115, 129, 95, 96, 72]. Основной идеей в реализации расчета двухфазной среды является предположение о том, что в потоке движется только мелкодисперсная влага, размерами которой можно пренебречь. На основе этого течение влажного пара представляется как течение смеси двух сплошных сред в газообразном и жидком состоянии, а основные параметры в каждой точке определяется следующим образом [91]:

$$\varphi_m = \varphi_v \beta + (1 - \beta) \varphi_p, \quad (1.7)$$

где φ - один из термодинамических параметров (энтальпия, энтропия и так далее); β - влажность пара; индекс «в» – относится к параметрам жидкой фазы, а «п» - паровой. При этом используемые расчетные модели термодинамического межфазового взаимодействия учитывают процессы неравновесной конденсации паровой и испарения жидкой фаз.

Заложенные в подобный подход для расчета влажно паровых потоков предположения накладывают некоторый ряд ограничений, которые могут существенно влиять на корректность получаемых данных:

1. Так как двухфазная среда представляется как однофазная, капли движутся без скольжения по отношению к основному потоку вдоль его линий тока. Таким образом, возможно рассмотрение перемещения только мелкодисперсной влаги. Кроме того, это подразумевает отсутствие механических потерь на разгон инертных крупных частиц влаги.

2. Отсутствие учета формирования водяной пленки. Это связано с довольно сложным математическим описанием организации бинарного жидкого подслоя и процессов его взаимодействия с паровым потоком. Это естественно приводит к тому, что в расчете не учитываются те процессы формирования влаги в межлопаточном канале, которые были описаны в разделе 1.3.

3. Не учитываются процессы взаимодействия капель между собой.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что при моделировании потоков влажного пара учитываются только термодинамический характер взаимодействия фаз, а механическое взаимодействие между частицами жидкости и основным потоком считается незначительным. Подобное упрощение может считаться справедливым при рассмотрении интегральных характеристик течения в последних ступенях паровых турбин, поскольку, как было показано в разделе 1.1, основная масса крупнодисперсной влаги сконцентрирована в узкой области, расположенной на периферии проточной части. Основываясь на этом, численные методы довольно широко используются при исследовании влажнопаровых потоков в проточных частях паровых турбин [115, 129, 130, 61, 133, 30].

В работах [129, 130] довольно подробно разобрано влияние различных процессов, протекающих в конденсирующейся среде, на интегральные потери энергии в ЦНД паровой турбины. По результатам проведенных делается вывод о том, что наибольший вклад в потери от присутствия в потоке влаги привносит термодинамический процесс конденсации пара (сюда также входят потери от расширения переохлажденного сухого пара), в то время как явления

механического разгона крупных капель влияют довольно слабо – от 0,05% до 0,2%.

Подробные результаты о распределении различных потерь энергии, связанных с влажным паром, представлены в [115]. Авторы разделили процессы диссипации энергии на следующие категории:

- Термодинамические потери, связанные с процессами теплопередачи между фазами. Включают в себя процессы ядрообразования вблизи зоны Вильсона (Δq_1).
- Механические потери на разгон мелкодисперсной влаги (Δq_2).
- Механические потери на разгон крупных частиц влаги (Δq_3) от выходной кромки сопловой лопатки до входной кромки рабочей.
- Потери на удар при попадании крупных капель на поверхности рабочих лопаток (Δq_4).
- Потери от формирования пленок на поверхности рабочей лопатки (Δq_5). Важно подчеркнуть, что в данном случае рассматривается только тот эффект, который связан с исчезновением из межлопаточного канала влаги, которая впоследствии не будет совершать полезную работу.
- Потери от переноса пленки на поверхности рабочей лопатки к периферийным сечением лопатки за счет центробежных сил (Δq_6).
- Потери с выходной скоростью – разница кинетических энергий между равновесным и неравновесным расширением пара в турбине за последней ступенью (Δq_7).

На Рисунке 1.31 представлены потери кинетической энергии, вызванные наличием в потоке влажно парового потока. На диаграмме отображены интегральные потери, рассчитанные в 4 последних ступенях паровой турбины АЭС 1000 МВт. Как видно из представленных данных, наибольший вклад в потери приносят термодинамический процесс конденсации (Δq_1) и оседание водяных пленок на поверхностях рабочих решеток (Δq_5). При этом механический разгон крупнодисперсной влаги практически не влияет на эффективность работы

паровой турбины. Автор данной диссертации считает, что представленные результаты являются неполными, хотя, безусловно, они представляют собой значительный практический интерес.

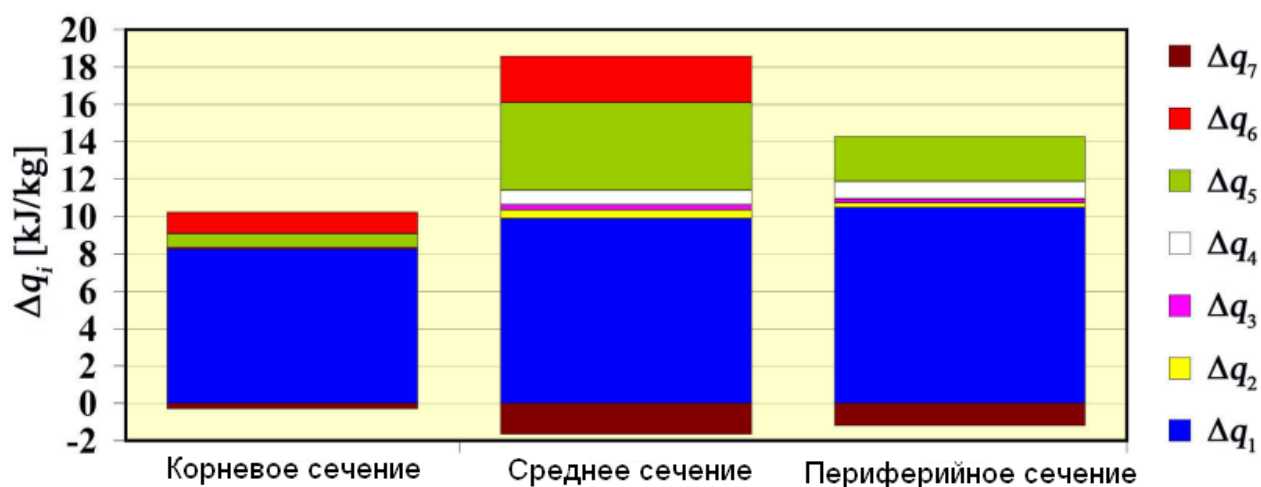


Рисунок 1.31.

Потери энергии от влажности

Отсутствие учета формирования водяной пленки на поверхностях лопаток в представленной работе (величина Δq_5 , как показано выше, определяет только процесс «исчезновения» влаги из канала) может привести к существенному искажению картины течения в периферийной области. Как показано в [44, 30, 70, 78], появление водяной пленки на поверхности лопатки может приводить к существенному изменению геометрии профиля, режиму его обтекания паровой фазой, а также происходит интенсификация процессов, описанных в разделах 1.3.3 и 1.3.4.

Экспериментальные исследования на модельной турбине с целью выявления потерь от проявления на поверхности сопловой решетки водяной пленки были проведены в [40]. Однако результаты были получены неоднозначные, так как при обработке данных некоторые параметры имели оценочный характер и не отражали реальные процессы в турбине. Данные по исследованию изолированных сопловых решеток [33, 4, 85, 22, 32, 34, 42, 36], когда искусственно создавалась крупнодисперсная влага на экспериментальном

стенде перед исследуемым объектом, показали, что наличие водяной пленки на поверхности лопатки существенно влияет на характеристики парового потока. На Рисунке 1.32 представлено распределение профильных потерь кинетической энергии за решеткой вдоль ее шага [36].

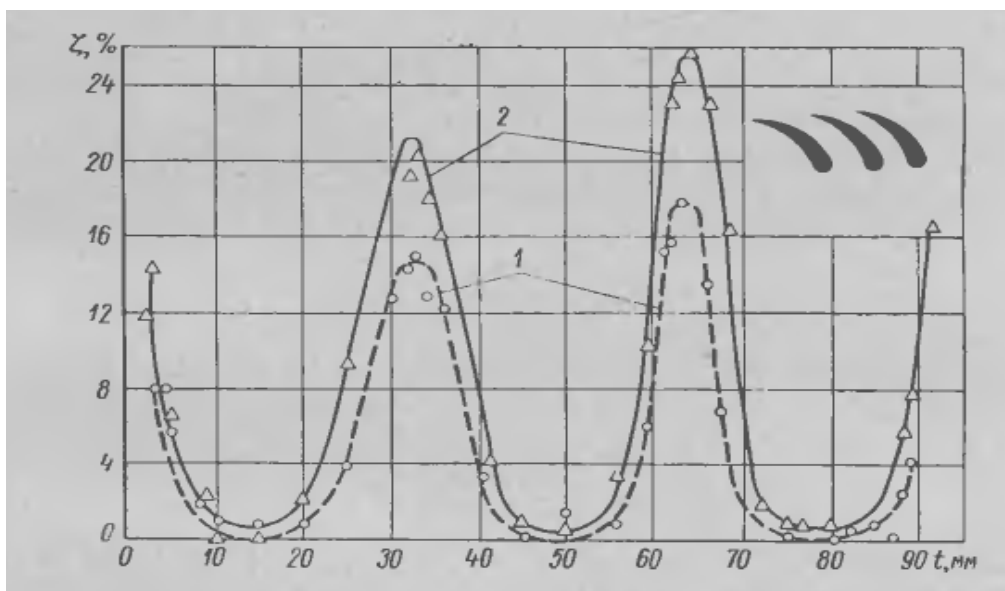


Рисунок 1.32.

Распределение потерь по шагу за сопловой решеткой. 1 – перегретый пар; 2 – начальная влажность $y_0 = 4,8\%$

Как видно из представленных данных, переход от перегретого пара к влажному приводит к существенному изменению параметров основного потока в области кромочного следа, где происходит срыв и дробление водяной пленки. Таким образом, при моделировании течения потока влажного пара в периферийной области последних ступеней паровых турбин, использование трех выше описанных допущений может привести к несколько некорректным результатам, так как в расчете не учитываются сложные процессы формирования и схода пленки с поверхности лопатки.

В качестве валидации расчетных методов в современной литературе используются две работы [93, 133]. Авторы проводили измерения профильных потерь кинетической энергии за пакетами плоских решеток и сравнили с

результатами математического моделирования. Рабочей средой являлся перегретый и влажный пар, поступающий на экспериментальный стенд из отборов паровой турбины. Средние размеры капель перед исследуемым каналом были равны 0,6 мкм. Максимальная начальная влажность составляла 1,6%. Таким образом, можно говорить о том, что в исследуемом канале двигалась преимущественно мелкодисперсная влага, которая перемещается вдоль линий тока основного потока. Это, а также тот факт, что перед решеткой создавалась довольно низкая влажность, не создало условий для активного формирования водяной пленки на поверхности лопатки.

Работы, в которых бы сравнивались результаты численного моделирования с экспериментальными данными в условиях развитого пленочного течения, автором найдены не были.

1.4.3. Движение крупнодисперсных частиц в межлопаточном сопловом канале

Решение уравнения 1.6 в проекциях на пространственные оси позволило исследовать характер движения крупнодисперсной влаги в межлопаточных каналах паровых турбин [95, 86, 43, 38, 82, 130, 50, 7, 71]. При этом во всех работах задавалось распределение дисперсного состава капель, коэффициенты скольжения и угол направления движения перед рассматриваемым каналом.

В работе [86] детально рассмотрены траектории движения частиц жидкой фазы в межлопаточных каналах. На Рисунке 1.33 представлены результаты расчета движения капель в решетке направляющих лопаток турбины К – 200-130. При движении в канале, как видно из Рисунка, практически все дискретные частицы размером 60 мкм оседают на вогнутой поверхности профиля, в то время как влага диаметром 5 мкм покидает решетку без взаимодействия со стенками профилей. Как уже отмечалось выше, малые размеры частиц способствуют сближению их траекторий с линиями тока паровой фазы, что является прямым следствием силового воздействия со стороны основного потока [80]. На характер движения дискретных частиц, помимо их размеров, существенно влияют характеристики как паровой, так и жидкой фаз. В работе [86] рассматривалось

только влияние начальных скоростей как паровой, так и жидкой фаз. Как видно из Рисунка 1.33, переход от равномерного (идеализированного) к неравномерному (приближенному к реальности) полю скоростей перед каналом, форма траекторий капель перестраивается, и это наиболее четко наблюдается в случае с крупнодисперсной влагой (диаметром 60 мкм). Авторы работы [43] отмечают, что результаты расчета траекторий капель носят сугубо индивидуальный характер и они не могут быть универсально распространены на другие режимные параметры.

В работе [82] рассматривается движение полидисперсного потока частиц в сопловом межлопаточном канале. На основе проведенного расчета автор получил данные о характере отклонения капель от линий тока основного потока (см. Рисунок 1.34) в решетках различной геометрии и при варьировании режимных параметров.

Здесь по оси ординат отложена величина:

$$\frac{z_1^* - z_{1i}}{z_1^* - \frac{u_0''}{u_0'} x_1}, \quad (1.7)$$

где z_1^* - координата выходной кромки лопатки вдоль вертикальной оси, совпадающей с шагом решетки (см. Рисунок 1.34), z_{1i} - координата капли i -го радиуса на срезе сопловой решетки (при координате x_1 на оси x на Рисунке 1.34); u_0'' - скорость паровой фазы вдоль вертикальной оси на входе в решетку; u_0' - скорость паровой фазы вдоль горизонтальной оси на входе в решетку. Числитель в данной формуле представляет собой отклонение траектории капли от выходной кромки, а знаменатель – отклонение линий тока пара от выходной кромки.

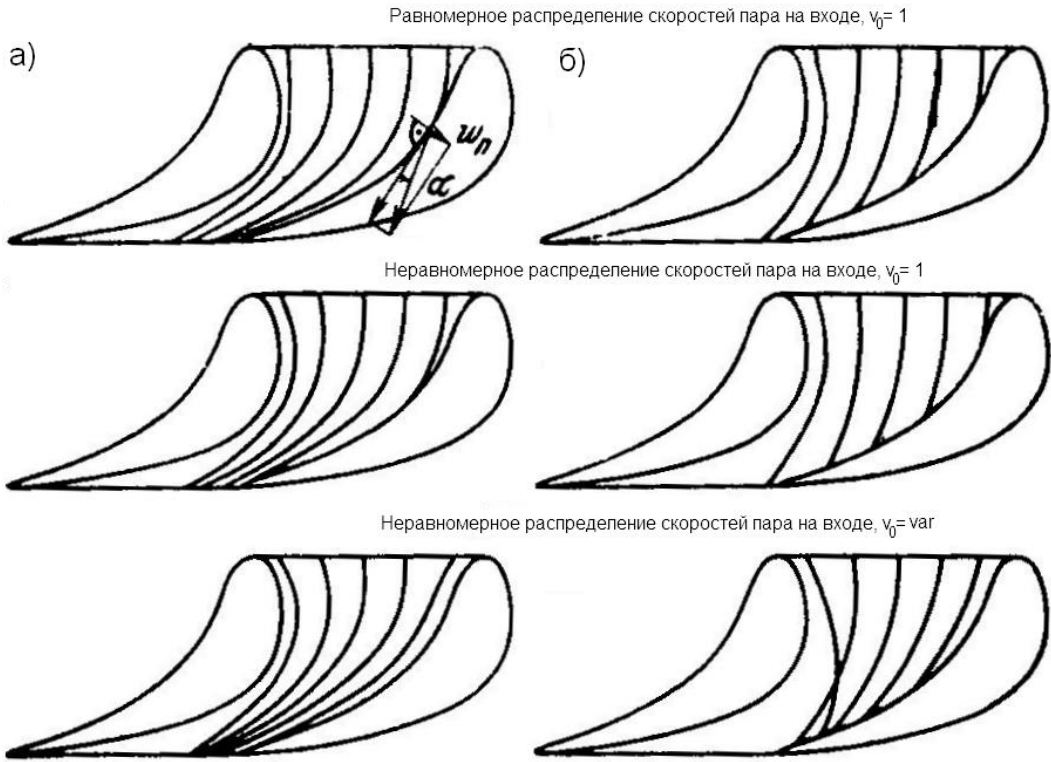


Рисунок 1.33.

Траектории частиц в каналах сопловой решетки турбины К-200-130 при различных начальных условиях. а – капли размером 5 мкм; б – капли размером 60 мкм

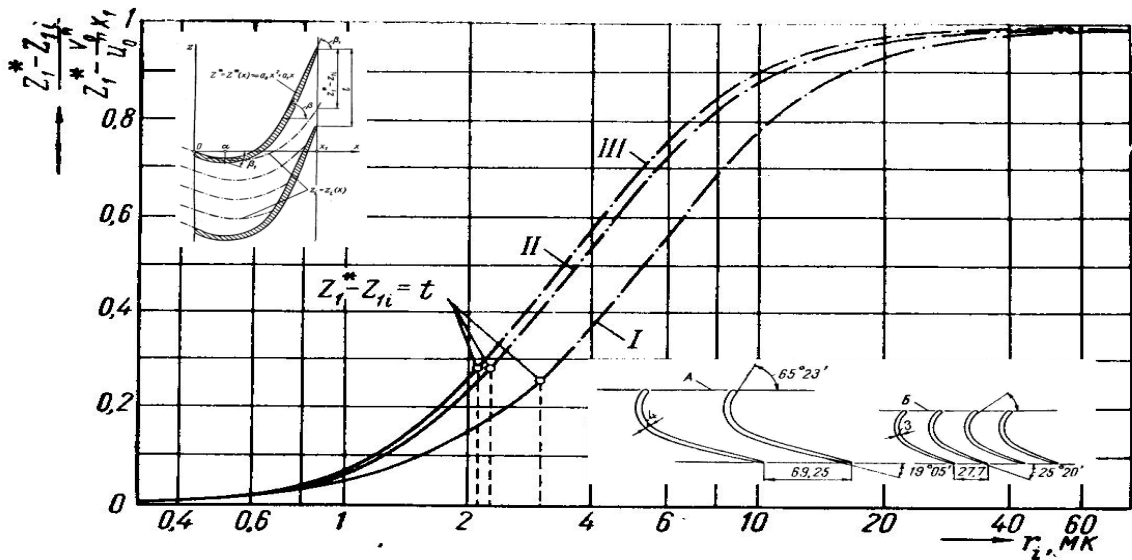


Рисунок 1.34.

Отклонение капель от парового потока на выходе из решетки. I – решетка А ($M_{1t} = 1,32, Re = 3,1 \cdot 10^5$); II – решетка Б ($M_{1t} = 0,88, Re = 1,5 \cdot 10^5$); III – решетка Б ($M_{1t} = 0,46, Re = 3,3 \cdot 10^5$)

По этим результатам можно судить о характере оседания влаги различных размеров на поверхности сопловых лопаток. Представление зависимости отклонения от радиусов частиц в подобной форме позволяет сравнить поведение капель на разных решетках и при различных режимных параметрах. До радиуса $r < 0,5$ мкм частицы жидкой фазы фактически не отклоняются от линий тока паровой фазы. В диапазоне $0,5 \text{ мкм} < r < 20 \text{ мкм}$ дискретные частицы слишком велики, чтобы полностью следовать за движением пара, вместе с тем они слишком малы, чтобы вообще не увлекаться основным потоком. При этом из графика видно, что указанные пределы изменяются в зависимости от параметров течения, а также от конфигурации межлопаточного канала. По Рисунку 1.34 также можно судить о том, до какого размера частицы проходят сопловую решетку, не попадая на вогнутую поверхность профиля. Для частиц, не осаждающихся на стенках, выполняется условие: $z_1^* - z_{1i} \leq t$ (где t – шаг решетки). Вся влага, для которой данное условие не выполняется, оседает на вогнутой стороне профиля. Таким образом, штрих – пунктирные линии на графике 1.34 не имеют практического значения. Для исследованных решеток все капли диаметрами больше 4 – 6 мкм не проходят канал без контакта с поверхностями лопаток.

В работе [43] были получены похожие данные для решетки другой конфигурации. По результатам расчетов было обнаружено, что начиная с диаметра 10 мкм, частицы жидкости не покидают межлопаточный канал и оседают на поверхностях лопаток.

Полученные расчетом граничные траектории капель различных размеров позволяют выявить сепарационную способность решетки турбомашин. Кроме того, данный подход позволяет оценить коэффициенты сепарации для различных капель (масса осевших частиц данного размера к суммарной массе запущенных в поток капель этого размера). Обобщенные теоретико-расчетные данные позволяют лишь приближенно определить долю влаги, оседающей на поверхности турбинных решеток [80]. Обобщенные данные для относительно крупных частиц жидкости представлены на Рисунке 1.21.

Проведенные в [43] исследования оседания полидисперсного потока жидкости на поверхности лопаток дают существенные рассогласования между расчетными и экспериментальными данными. Результаты прямых измерений расхода через сепарирующую щель на поверхности лопатки говорят о том, что сепарируется 7 – 10,5% всей влаги, находящейся в потоке. При этом данные, полученные расчетным путем по уравнению 1.6, говорят о выпадении на стенку до 70% влаги, находящейся в канале. Подобное рассогласование авторы [43] объясняют наличием сложных процессов отражения и уноса капель с поверхности пленок, которые были рассмотрены в разделе 1.3.3.

Таким образом, несмотря на то, что подход для исследования характера движения крупнодисперсных капель в межлопаточных каналах, описанный в данном разделе, не учитывает большое количество сложных явлений, связанных как с межфазовым, так с внутрифазовым взаимодействиями, была получена важная с практической точки зрения информация о траекториях перемещения частиц жидкой фазы. На основе полученных данных можно говорить о том, что при диаметре капли больше 5 мкм, ее траектория начинает существенно отклоняться от линий тока паровой фазы, что приводит к более чем 10% доли оседающих частиц влаги на стенках лопаток по отношению к суммарному количеству частиц данного размера.

Применение представленного метода расчета представляется перспективным с практической точки зрения при решении обратной задачи. То есть, по имеющимся данным о векторных полях паровой и жидкой фаз определить траектории движения жидкой фазы и рассчитать с помощью уравнения 1.6 диаметры частиц вдоль кривых их движения. Подобный подход позволит детально изучить характер распределения параметров жидкой фазы в наиболее важной с практической точки зрения области проточной части турбины – межосевом зазоре. Полученные данные дают возможность наиболее детально исследовать картину взаимодействия крупнодисперсной влаги с входными кромками рабочих лопаток [71].

Важным аспектом для применения этого метода является получение данных о характере распределения параметров жидкой фазы в исследуемой области, которые должны представлять собой векторные поля скоростей капель. Применение точечных методов, таких как метод отпечатков [31], метод индикатрисы рассеивания [84], метод лазерной доплеровской анемометрии [16], которые были использованы ранее для исследования структуры крупнодисперсных потоков влаги (см. разделы 1.3.1 и 1.3.2), представляет собой довольно сложную задачу, так как необходимо траверсирование большого числа точек потока за исследуемой решеткой. Однако применение современных методов позволяет получать распределение полей характеристик дискретных фаз.

1.5. Современные методы исследования скоростных характеристик потока

В настоящее время широко применяются методы бесконтактной лазерной диагностики потоков – PIV, PTV, позволяющие определять поля скоростей частиц в потоке. Характер их работы принципиальным образом отличается от методов, описанных выше. Основой является обработка полученных картин образов засвеченных лазером частиц [57]. Полномасштабная реализация подобных методов стала возможна только после появления достаточно мощных компьютеров.

Существует большое количество работ, в которых лазерная диагностика потоков была успешно применена [111, 124, 98, 102, 114]. PIV, PTV методы в этих исследованиях использовались для определения скоростей несущей фазы: исследуемое течение искусственно засеивалось дискретными частицами – трассерами, имеющими малые размеры и двигающимися практически со скоростью основного потока. В работе [127] исследовалось поле скоростей вокруг профиля крыла. Схема проведения эксперимента представлена на Рисунке 1.35.

Воздух, искусственно заполненный трассерами (в данном случае использовались монодисперсные капли масла), поступает в исследуемую область, в которой установлен профиль. Лазер, создавая два последовательных импульса, засвечивает частицы в потоке, а получаемая картина фиксируется регистратором

изображения (фотокамерой, экраном), после чего происходит ее обработка. В результате, в предположении, что трассеры движутся практически со скоростью несущей фазы, было получено распределение скоростей потока вокруг профиля, представленное на Рисунке 1.36.

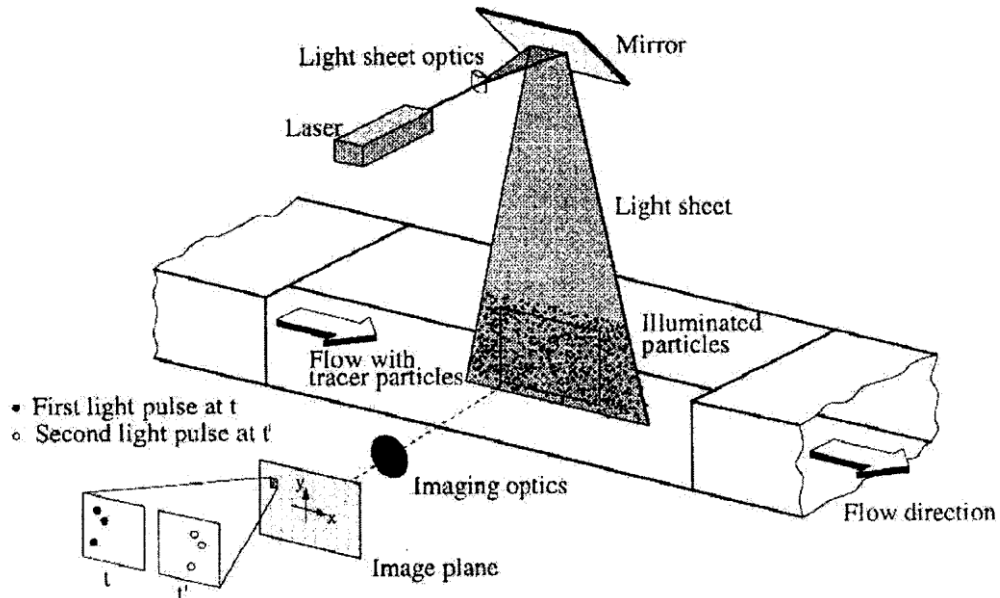


Рисунок 1.35.

Схема эксперимента

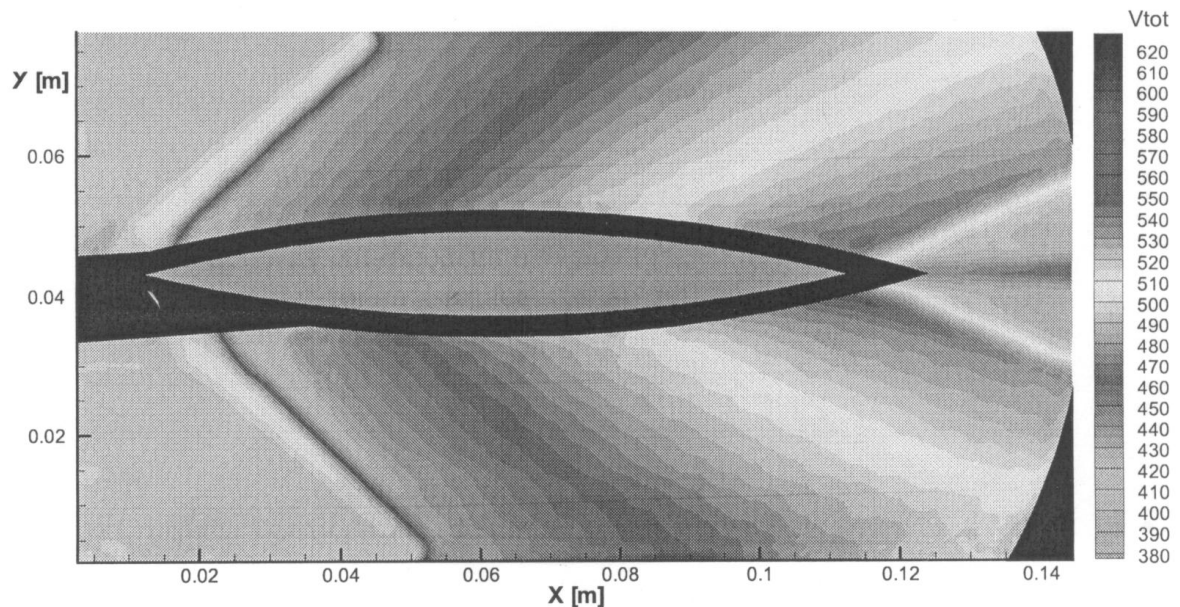


Рисунок 1.36.

Поле скоростей, полученное PIV методом

Основными достоинствами PIV, PTV методов являются: бесконтактность, возможность получения мгновенных полей распределения скоростей [58].

Применение PIV метода в последнее время широко используется для исследования характера течения однофазных потоков в проточных частях турбин [108, 135]. Схема исследования скоростных характеристик потока в осевом зазоре представлена на Рисунке 1.37. Рассмотрено 2 подхода к применению систем лазерной диагностики с применением эндоскопов. В обоих случаях основной идеей является введение лазерного ножа в проточную часть турбины и обеспечение возможности получения фотографий засвеченных трассеров. Подобная компоновка позволяет минимизировать аэродинамическое возмущение, вносимое в поток введением оптических приборов. Как результат, корреляционный метод PIV позволяет получать мгновенные и осредненные поля скоростей турбины (см. Рисунок 1.38).

До недавнего времени корреляционные методы определения полей скоростей PIV для исследования течения влажного пара в элементах проточных частей паровых турбин не применялись. Автор данной работы не нашел публикаций сторонних авторов о проведении подобных исследований.

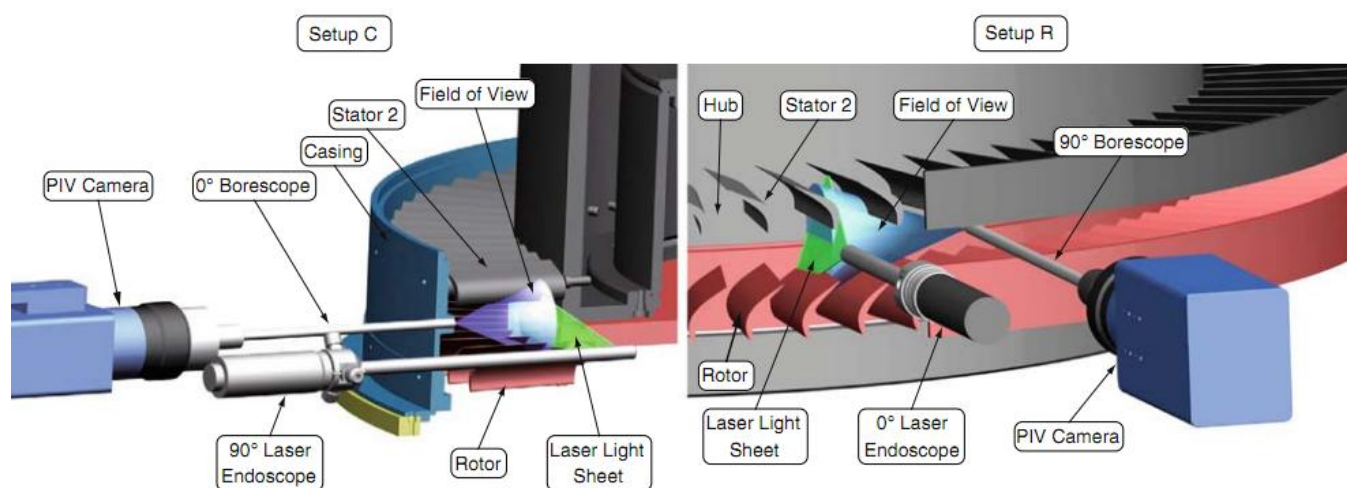


Рисунок 1.37.

Схема применения PIV метода для исследования характера течения в турбине

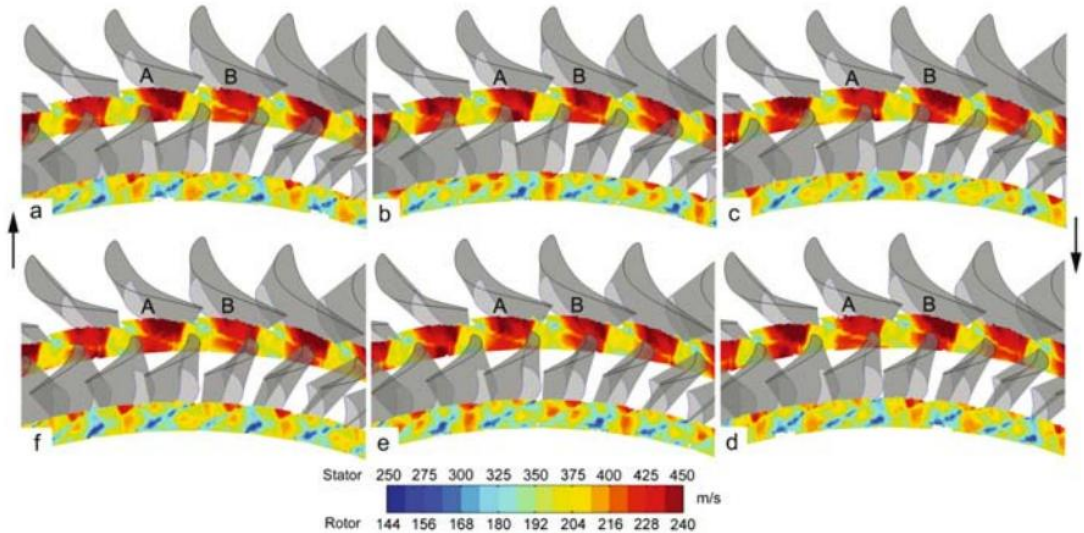


Рисунок 1.38.

Осредненное поле скоростей потока в осевом зазоре турбины [135]

Необходимо отметить исключительную важность применения PIV метода для исследования структуры потока капель в области за сопловой решеткой. Получаемые в результате применения системы лазерной диагностики векторные поля несут в себе информацию о проявлениях различных источников крупнодисперсных капель в канале, описанных в разделах 1.3.1 – 1.3.3, что позволяет более подробно исследовать структуру потока в различных зонах потока. Детальный анализ полученных данных позволяет выявить и определить основные характеристики сформированных частиц жидкой фазы за сопловой решеткой. Кроме того, особенности подхода к определению скоростей, основывающиеся на фотографиях засвеченных трассеров, позволяют проводить детальный визуальный анализ структуры капельного потока в исследуемых каналах.

Особенностью проведенных на данный момент исследований с применением систем лазерной диагностики потоков является то, что рассматриваются поля скоростей сплошной среды, основываясь на данных монодисперсных трассеров, движущихся со скоростями основного потока. Другими словами данная система не адаптирована для ее применение в условиях полидисперсной дискретной среды, На данный момент отсутствуют методы

выделения отдельных потоков и классификации капель по их размерам (на крупные и мелкие). Кроме того, применяемый на данный момент подход по использованию PIV метода, не учитывает различных негативных явлений, связанных с наличием жидкой фазы, которые будут описаны в Главе 3.

1.6. Постановка задачи на исследование

Обзор литературы показал, что основная масса крупных частиц влаги, которые вызывают эрозионный износ рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин, формируется в периферийной области за сопловой решеткой. Ее массовая составляющая может достигать 50% от всего расхода дискретной фазы в данной зоне. Проведено большое количество фундаментальных исследований для определения основных параметров капель больших диаметров в осевом зазоре турбинной ступени. На основе полученных данных имеются представления о характере распределения потоков крупнодисперсной влаги. При этом влияние различных явлений образования эрозионно-опасных капель, а также процессов межфазового и внутри фазового взаимодействия существенно зависит от геометрии профилей лопаток и режимных параметров течения. Важно отметить, что комплексное экспериментальное исследование распределения характеристик частиц жидкой фазы точечными методами (которые измеряют параметры среды в точке) является довольно сложной и длительной операцией. По этой причине на данный момент отсутствует информация о параметрах жидкой фазы во всем межосевом пространстве, что не позволяет в полной мере судить о характере натекания различных потоков капель на входные кромки рабочих лопаток

Процесс движения частиц дискретной фазы в межлопаточном канале в первую очередь определяется размерами капель, а также геометрией профиля. Обзор работ по данному направлению показал, что при диаметре частиц больше 5 мкм их траектории начинают существенно отклоняться от линий тока несущего потока, что приводит к интенсификации оседания крупной влаги на поверхности лопаток. Математическое моделирование влажнопаровых потоков, которое широко применяется в настоящее время, довольно корректно определяет параметры многофазной среды при условии наличия в течении только мелких

частиц. При этом сложность математического описания формирования жидких пленок на стенках профилей, явлений срыва и отражения капель не позволяют моделировать движение крупнодисперсных частиц в осевом зазоре ступеней паровых турбин.

Применение современных методов лазерной диагностики для исследования течения полидисперсных сред в перспективе позволит получать мгновенные и статистически осредненные поля скоростей дискретной фазы, которые несут в себе информацию обо всех потоках капель, образованных в межлопаточных каналах сопловых решеток. Полученные данные позволят проводить комплексные исследования течения влажнопаровых потоков в осевых зазорах турбинных ступеней. Однако, в силу того, что корреляционный метод PIV в этой области не применялся, на данный момент отсутствует некоторый инструментарий по обработке получаемой информации. В первую очередь это уменьшение негативных влияний, связанных с наличием в потоке жидкой фазы, на качество получаемых данных, а также отсеивание мелкодисперсной влаги с целью исследования движения крупных капель в потоке.

Экспериментальные данные о векторных полях скоростей жидкой фазы, а также результаты численного моделирования параметров основного потока, позволяют решить задачу по определению средних размеров капель вдоль их характерных траекторий за сопловой решеткой.

Таким образом, из обзора литературы вытекают следующие задачи для исследования:

1. Разработать эффективную методику применения системы лазерной диагностики для определения скоростных характеристик крупных капель в потоке.
2. Настроить и проверить математическую модель влажнопаровых потоков для обеспечения получения корректных данных о параметрах паровой фазы при наличии крупнодисперсной влаги в потоке.
3. Разработать и верифицировать методику бесконтактного определения средних размеров крупных капель вдоль их траекторий основываясь на

экспериментально определенных полях скоростей жидкой фазы и данных о паровом потоке, полученных методом математического моделирования.

4. Опробовать разработанные методы и подходы при исследовании структуры капельного потока за изолированной сопловой решеткой и определить влияние режимных параметров на распределение основных характеристик частиц жидкой фазы в потоке.

Глава 2. Экспериментальный стенд, модели и методика исследований

2.1. Методика экспериментальных исследований

2.1.1. Тепловая схема экспериментальной установки

Исследовательская работа выполнялась на пародинамическом стенде КВП (контур влажного пара), который расположен на кафедре паровых и газовых турбин НИУ МЭИ. Данная экспериментальная установка имеет общую тепловую схему с учебно-экспериментальной ТЭЦ МЭИ. В состав стенда входит несколько отдельных объектов: КВП-1, КВП-2, КВП-3, КВП-4, КВП-6, которые призваны решать различные задачи, связанные с течением двухфазных сред в проточных частях паровых турбин. При этом они позволяют реализовывать широкий спектр режимных параметров потока как по числу теоретического числа Маха (дозвук, трансзвук, сверхзвук), так и по начальному состоянию пара (перегретый, сухой насыщенный, влажный).

Исследования проводились на экспериментальном стенде КВП-2, принципиальная тепловая схема которого представлена на Рисунке 2.1.

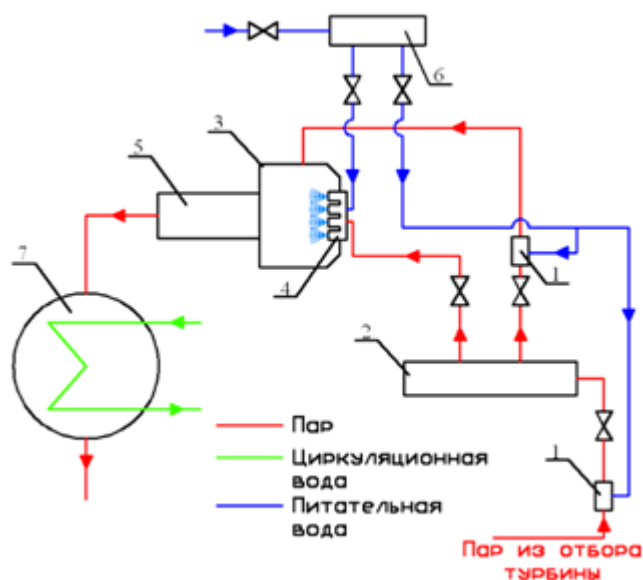


Рисунок 2.1.

Принципиальная тепловая схема стенда КВП-2. 1- ступень увлажнения; 2 – коллектор отборного пара; 3 – бак ресивер; 4 – блок пародутьевых форсунок; 5 – исследуемый объект; 6 – коллектор питательной воды; 7 – конденсатор.

Перегретый пар из отбора турбины доводится до состояния насыщения в двух ступенях увлажнения путем впрыска питательной воды. Таким образом, в баке ресивере стенда формируется равновесная среда сухого насыщенного пара. Для создания начальной влажности рабочего тела перед исследуемым объектом используется блок пародутьевых форсунок, которые формируют полидисперсную жидкую фазу в баке ресивере впрыском питательной воды. Плотность функции распределения (по массе и концентрации) образовавшихся капель по размерам представлена на рисунке 2.2. Подготовленная влажнопаровая среда поступает в исследуемый канал, после чего направляется в конденсатор, и конденсат возвращается в тепловой цикл электростанции.

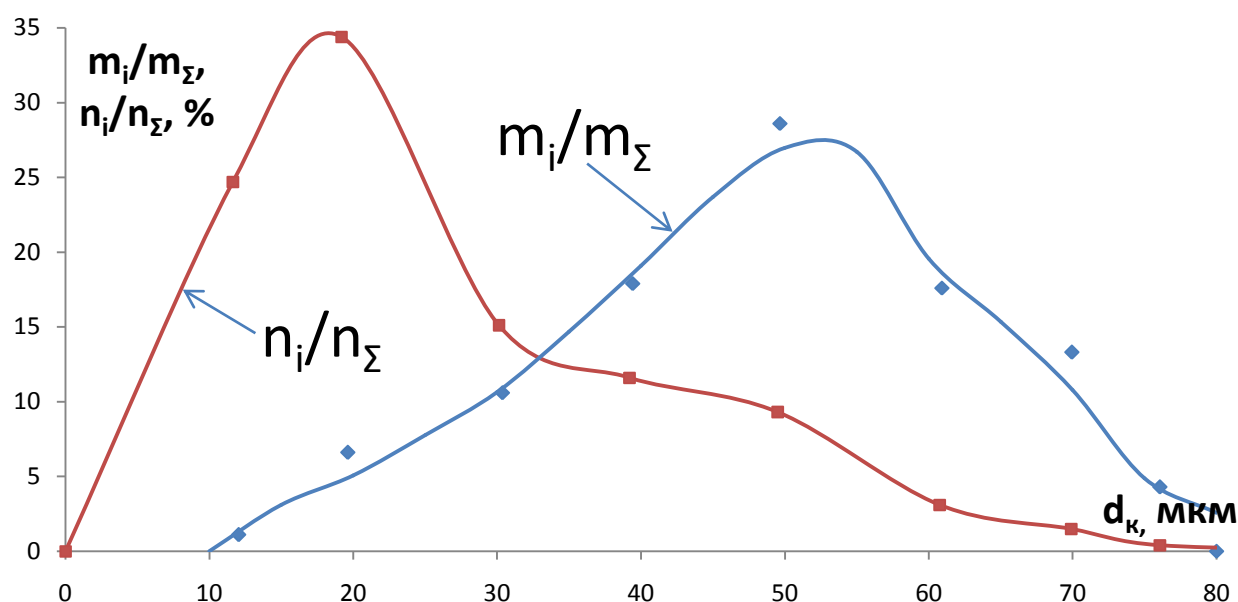


Рисунок 2.2.

Функция плотности распределения дисперсного состава капель, формируемых форсунками

Особенностью данного стенда является возможность использования съемных рабочих частей, в которые устанавливаются объекты исследования. Это критически важно с точки зрения чистоты эксперимента, так как различные объекты исследования требуют индивидуальных параметров обтекания потоком. Кроме того, это позволяет на одном и том же стенде проводить испытания различных элементов проточных частей турбомашин. В Таблице 1 представлены

параметры рабочей среды для стенда КВП-2. На рисунке 2.3 представлен общий вид стенда КВП-2.

Таблица 1.

Параметры рабочей среды в стенде КВП-2

Давление пара из отбора турбины, МПа	Давление питательной воды, МПа	Максимальное давление в ресивере, МПа	Максимальная температура в ресивере, °С	Давление в конденсаторе, кПа
0,6	6	0,17	195	4-100



Рисунок. 2.3.

Внешний вид КВП – 2 со стороны ресивера

2.1.2. Система пневмометрических измерений ИВК МІС-300М

Для измерения основных режимных параметров потока, таких как температура полного торможения перед исследуемым объектом и статическое давление на стенках канала, используется система пневмометрических измерений МІС-300М.

В [47] наиболее подробно рассмотрена работа ИВК МІС-300М, который решает следующие задачи: сбор, преобразование, регистрация, обработка, передача и представление информации с датчиков и измерительных преобразователей. Комплекс включает в себя стойку с первичными преобразователями сигнала, которая устанавливается непосредственно вблизи экспериментального стенда, приборной стойки с МІС-300М (см. Рисунок 2.4) и рабочего места удаленного доступа, расположенного в звукоизолированном помещении (см. Рисунок 2.5).



Рисунок 2.4.

Измерительно-вычислительный комплекс на базе МІС-300М



Рисунок 2.5.

Рабочее место удаленного доступа

Открытая архитектура, а также легкость в масштабировании ИВК МІС-300М позволяют ему работать с различными видами первичных измерительных

преобразователей, принципы работы которых основаны на разных эффектах (пьезоэлектрические, емкостные, пьезорезистивные и так далее).

Для измерения статического давления вдоль стенок каналов использовался пароконмутатор ИДК-16 производства НПП «Мера» (см. Рисунок 2.6), который позволяет измерять давление по одному из 16 каналов. Для избегания негативных эффектов, связанных с аккумуляцией влаги в дренажных трубках, имеется функция продувки. ИДК – 16 включает в себя [56]:

- 3 датчика давления на размерные диапазоны с выходом 4..20 мА [53].
- Систему клапанов для коммутации выходных каналов, входа продувки, датчиков.
- Модули измерения и управления (один токовый модуль МС – 114С для измерения сигналов с датчиков давления, два модуля дискретного вывода МС-404 для управления клапанами входных каналов, входа продувки и датчиков).

ИДК-16 имеет интерфейс Ethernet и может подключаться к локальной сети, тем самым производится его интеграция с измерительно-вычислительным комплексом МИС-300М.

Для измерения температуры полного торможения [68] перед исследуемым объектом используется термопара КТХК02.01-С10-И-1,0-1000/2000 - кабельный термопреобразователь ХК (хромель-капель) с изолированным рабочим спаем в стальной оболочке диаметром 1 мм. Обеспечивается одновременное измерение сигнала по 32 каналам.



Рисунок 2.6.

Пароконмутатор ИДК-16

2.1.3. Прибор теневой автоколлимационный ИАБ-451

Для визуализации волновой структуры потока использовался теневой автоколлимационный прибор ИАБ-451 – Теплер. Принцип его действия основан на шлирен-методе.

Шлирен-метод [68] - метод обнаружения оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах на основе изменения коэффициента преломления. Применительно к потокам сплошных сред, данный метод, выявляет неоднородности в распределении плотности среды, что делает его наиболее эффективным методом для экспериментальной визуализации волновых эффектов при сверхзвуковом течении.

Принцип действия шлирен-метода заключается в следующем [68]. Поток лучей от точечного или полосового источника излучения (см. Рисунок 2.7) рассеивается линзой (2) и направляется в поток через исследуемый объект (3). После чего собирается линзой (2') и фокусируется на непрозрачной ширме (5), на конце которой расположена острая кромка, представляющая собой нож Фуко. При этом пучок лучей фокусируется непосредственно на самом краю непрозрачной ширмы. Таким образом, при отсутствии неоднородности в потоке, все лучи будут поглощаться непрозрачной ширмой, проявление же оптической неоднородности (4) приведет к рассеиванию пучка вследствие возникновения области переменного показателя преломления. Наблюдать изменения плотности в потоке можно при наличии экрана (7), на который с помощью оптического окуляра (6) проецируется изображение (8).

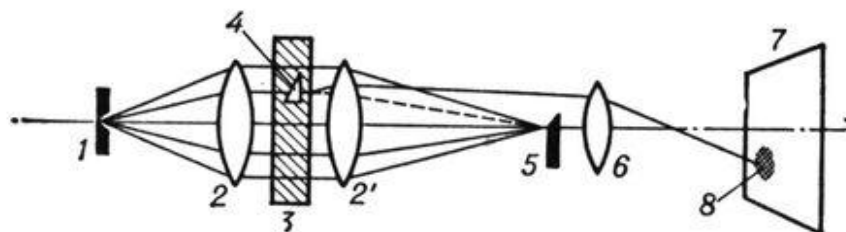


Рисунок 2.7.

Принципиальная схема шлирен-метода

В [68, 51] отмечается, что применение данного метода в условиях влажнопарового потока на экспериментальном стенде связано с рядом ограничений и сложностей. К ним можно отнести наличие активных конвективных потоков, вызванных температурными неоднородностями в среде, что делает наблюдаемую картину сильно «размытой» при максимальной чувствительности теплера; существенно нестационарный характер протекающих в процессе течения пара явлений и так далее.

Оптическая схема автоколлимационного оптического теневого прибора представлена на Рисунке 2.8.

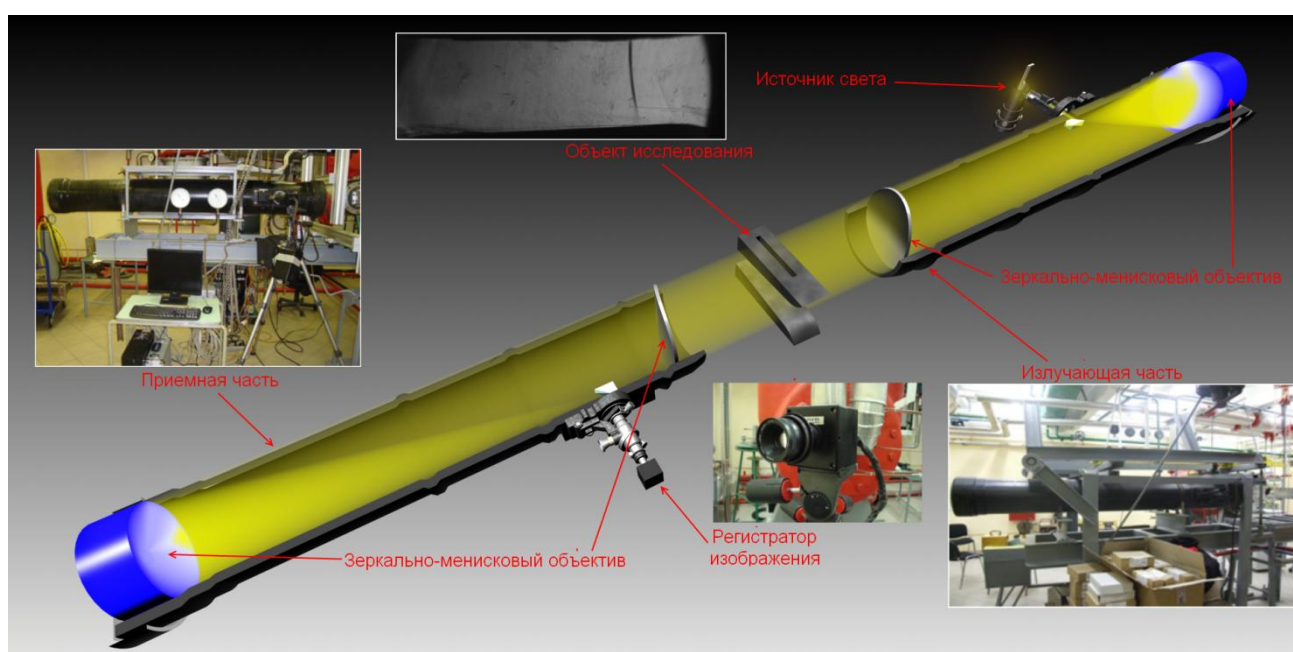


Рисунок 2.8.

Принципиальная оптическая схема автоколлимационного теневого прибора

Плоскопараллельный световой поток от источника света, расположенного в излучающей части, формируется зеркально-менисковым объективом и проходит через область течения в исследуемом объекте. После чего с помощью линзы и зеркала в приемной части направляется на нож Фуко и посредством объектива проецируется в регистраторе изображения. Особенности применения теплера непосредственно к исследуемым в работе объектам будут рассмотрены ниже.

В качестве регистратора изображения используется система Видеоскан [68], которая включает в себя скоростную камеру видеосъемки ВидеоСпринт-G6, камеру фотосъемки ВИДЕОСКАН-285-2001, а также систему записи и хранения данных. Технические характеристики цифровой скоростной видеокамеры ВидеоСпринт-G6 [68]:

- Максимальная частота съемки: 5кГц.
- Максимальное разрешение камеры: 1280*1024 пикселей.
- Исполнение: монохромное.
- Геометрический размер светочувствительной области: 15,3x12,3 мм.
- Длительность экспозиции: от 2 мкс до кадрового периода.

Технические характеристики цифровой скоростной фотокамеры ВИДЕОСКАН-285-2001 [68]:

- Максимальная кадровая частота при максимальном разрешении: не менее 7,5 Гц.
- Длительность экспозиции: от 3,5 мкс до 130 мс.
- Разрешение: не менее 1340*1038 пикселей.
- Размер монохромной матрицы: 2/3 дюйма.

2.1.4. Система лазерной диагностики потоков «Полис»

Система лазерной диагностики «ПОЛИС», которая реализует кросскорреляционные методы PIV, PTV, IPI, предназначена для определения мгновенных полей скоростей, концентрации и размеров трассеров, попадающих в область оптической видимости системы. Комплектация системы «ПОЛИС» представлена на Рисунке 2.12, а принцип работы метода лазерной диагностики – на Рисунке 2.13 [57]. Сдвоенный импульсный лазер Quantum Big Sky Laser последовательно создает два коротких по времени световых импульса, которые за счет специальной насадки формируют плоскость – лазерный нож, который направляется в область исследуемого потока. Лазерное излучение засвечивает движущиеся в потоке трассеры, а скоростная камера (TSI), которая синхронизирована с лазером, делает две фотографии. Таким образом, сохраняется

два состояния движущейся дисперсной системы, разница во времени между которыми известна.

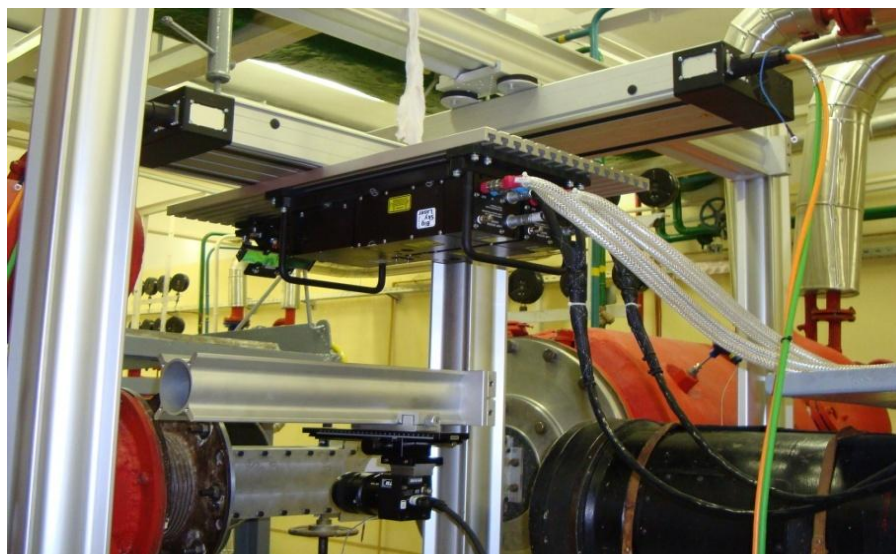


Рисунок 2.12.

Система лазерной диагностики «Полис»

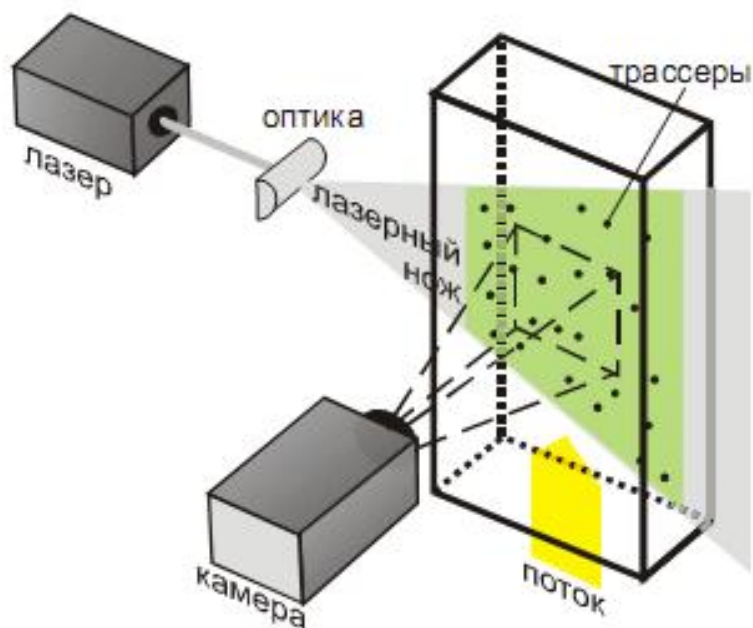


Рисунок 2.13.

Схема метода лазерной диагностики потока

Методы кросскорреляционного анализа PIV/PTV/PII основаны на обработке получаемых изображений. В результате их работы можно получить следующие

данные: мгновенное поле скоростей на равномерной сетке (PIV); мгновенное поле скоростей на неравномерной сетке (PTV); поле распределения размеров трассеров (PI). Опыт эксплуатации системы «ПОЛИС» [12, 19, 73, 74] показал, что на данный момент реализация PI метода во влажно паровом потоке затруднительна в связи с большой концентрацией капель в потоке.

В настоящей работе используется PIV метод. Данная методика реализована в программном комплексе ActualFlow, интегрированном в систему «ПОЛИС». Принцип действия подробно описан в [57]. Каждое изображение разбивается на элементарные области, в которых рассчитывается максимум корреляционной функции:

$$\varphi_{I_1 I_2}(m, n) = \sum_{l=-d_y/2}^{d_y/2} \sum_{k=-d_x/2}^{d_x/2} I_1(k, l) \cdot I_2(k + m, l + n), \quad (2.1)$$

где $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ - интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) в элементарной области для первого и второго кадров соответственно. Максимумом корреляционной функции соответствует наиболее вероятному смещению трассеров [57]. При этом используется подпиксельная точность для достижения наибольшей точности определения смещения системы в элементарной области.

Для расчета выражения (2.1) используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы, в соответствии с которой [57]:

$$\varphi_{I_1 I_2} = \mathfrak{F}^{-1}[\mathfrak{F}[I_1] \cdot \mathfrak{F}^*[I_2]], \quad (2.2)$$

где \mathfrak{F} и \mathfrak{F}^{-1} – прямое и обратное преобразование Фурье соответственно. В результате в каждой элементарной области по максимуму корреляционной функции определяется величина смещения трассеров между двумя кадрами (\bar{D}). Зная величину задержки между двумя импульсами лазера (Δt) можно определить вектор скорости:

$$\bar{V} = S \cdot \frac{\bar{D}}{\Delta t}, \quad (2.3)$$

где S - масштабный коэффициент для пересчета скорости в м/сек. Разработчики системы «ПОЛИС» отмечают следующие характеристики PIV метода [57]:

- Диапазон измеряемых скоростей 0,001-1000 м/с.
- Базовая погрешность измерения полей скорости – не более 1 %.

Общий алгоритм работы PIV метода представлен на Рисунке 2.14.

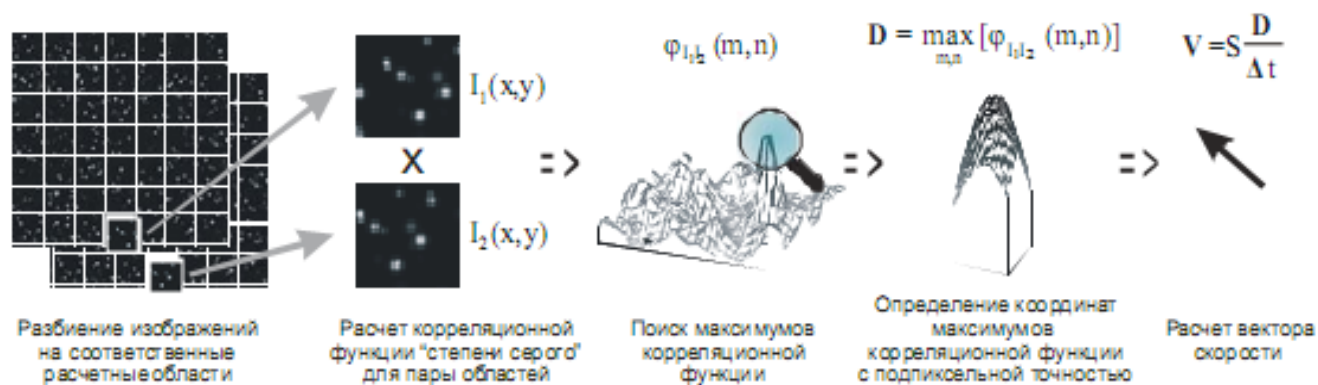


Рисунок 2.14.

Кросскорреляционный алгоритм вычисления векторов скорости по изображениям частиц в потоке [57]

Помимо определения мгновенных полей скоростей, алгоритмы, реализованные в программе ActualFlow, позволяют получать статистически осредненные картины течения по группе полученных в результате работы PIV алгоритма распределений скоростей в потоке [57]. Данная процедура основана на анализе функции плотности вероятности (ФПВ) пульсаций скорости в каждой пространственной точке, которой соответствует вектор скорости. Основное предположение, на котором построен подход – это экспоненциальное (гауссово) затухание ФПВ. На основе этого метода происходит фильтрация векторных полей итерационным путем: все вектора, для которых хотя бы одна компонента скорости не попадает в область осредненного отклонения от среднего значения, считаются неверными. После проведенной фильтрации производится расчет осредненного поля скоростей путем расчета математического ожидания компонентов скорости в каждой точке исследуемой области.

В [68] изложены общие принципы и рекомендации по применению системы лазерной диагностики «ПОЛИС» для исследования влажно паровых потоков.

2.1.5. Измерение размеров капель с помощью метода инерционного осаждения

Верификация разрабатываемой в данной работе методики бесконтактного определения размеров капель производилась с использованием метода осаждения, позволяющего определять дисперсный состав капель в потоке. Этот подход основан на инерционном осаждении капель влаги на покрытую вязким маслом пластину. Схема зонда представлена на Рисунке 2.15. На улавливающую пластину (3), которая расположена на штанге (1), наносится слой вязкого вещества (в данном случае силиконовый вазелин, разбавленный керосином). После чего штанга устанавливается во внешний корпус (2) таким образом, чтобы ось приемного отверстия (4) была параллельна плоскости улавливающей пластины. При этом положение штанги относительно внешнего корпуса (2) обеспечивается с помощью направляющих штифтов (5). Данный зонд устанавливается в поток таким образом, чтобы вектор скорости среды был направлен вдоль оси приемного отверстия (4). После чего штанга прокручивается вокруг своей оси на 180 градусов, тем самым открывается и закрывается доступ для полидисперсной среды к улавливающей пластине (3). На поверхность вязкого слоя попадают капли и консервируются на нем. Зонд выводится из потока и улавливающая пластина устанавливается под микроскоп (см. Рисунок 2.16). Установленной на окуляр оптического прибора цифровой фотокамерой DCIM510 делается снимок осажденных частиц жидкой фазы. Обработка полученных фотографий производится в специализированной программе ScopePhote. Зная о величине масштабного коэффициента (какое количество пикселей изображения содержится в одном миллиметре), можно определить размеры каждой капли на изображении.

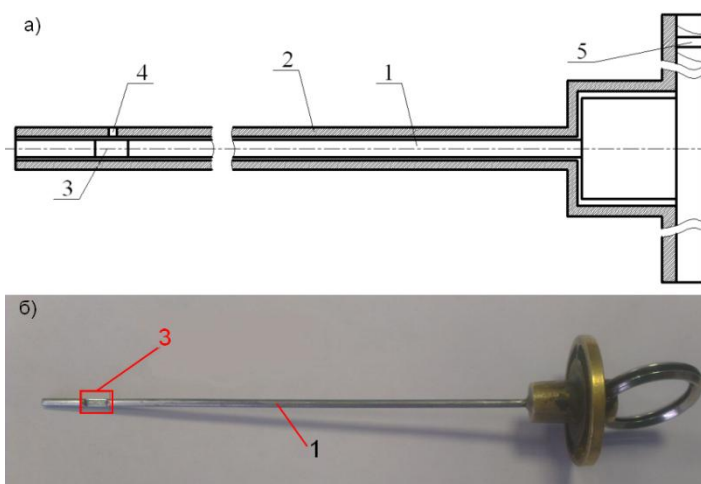


Рисунок 2.15.

Зонд инерционного осаждения капель. а: схема зонда; б: внешний вид штанги с улавливающей пластинкой



Рисунок 2.16.

Оптический микроскоп с установленной цифрой фотокамерой

2.1.6. Рабочая часть и исследуемые объекты

Для проведения исследований в одиночных каналах использовалась съемная рабочая часть, представленная на Рисунке 2.17.

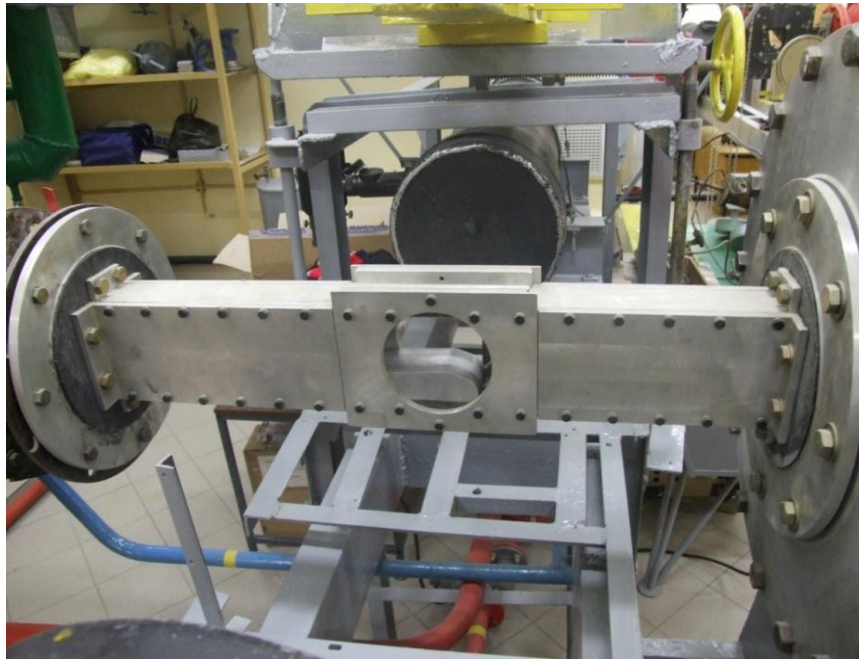


Рисунок 2.17.

Рабочая часть для исследования одиночных каналов

Для решения задачи 2, поставленной в первой Главе, экспериментальные исследования проводились в плоском несимметричном сопле Лавалья, геометрические характеристики которого представлены на Рисунке 2.18, здесь же изображена схема рабочей части. Расчетный режим исследуемого канала достигается при величине $\varepsilon = 0,315$ на срезе сопла, значение ε определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{p}{p_0}, \quad (2.4)$$

где p - статическое давление в точке исследуемого канала; p_0 – давление полного торможения потока перед соплом. При этом на срезе сопла достигается безразмерная скорость $\lambda = 1,34$.

Пар в рабочую часть поступает из ресивера КВП 2. В ее боковой стенке организовано отверстие, в которое установлено оптическое стекло (8 на Рисунке 2.18). Оно предназначено для визуального наблюдения с помощью теневого прибора ИАБ-451 за волновыми процессами, проявляющимися в потоке. При этом отверстия 8 выполнены с двух сторон рабочей части, а их образующая ограничивает область оптических наблюдений. Специальные камеры 2,

предназначены для отбора водяной пленки с поверхности и ее удаления через дренажи 3, которые соединены с системой сепарации пленки, о которой будет сказано ниже. Организованная таким образом сепарация необходима для повышения качества работы оптических методов исследования, так как образующаяся на стеклах водяная пленка расфокусирует получаемое изображение, а также уменьшает количество поступающего на регистрирующие приборы света.

Для определения начальных параметров пара перед соплом в рабочей части установлены зонды давления полного торможения 1 и температуры полного торможения 4. В профилированной вставке сопла 5 сделано сверление (7), выведенное за пределы рабочей части, которое предназначено для измерения статического давления влажнопарового потока за исследуемым каналом.

Помимо визуального наблюдения за проявлением волновой структуры сверхзвукового потока, в сопле Лаваля производилось измерение статического давления вдоль профилированной стенки канала (см. позицию 5 на Рисунке 2.18), в которой были организованы дренажные отверстия. На Рисунке 2.19 представлено расположение дренажных отверстий с их относительными координатами вдоль оси x .

Началом координат для оси является положение горла канала. Значения относительных координат, отмеченных в прямоугольниках на Рисунке 2.17, определялись следующим образом:

$$\bar{L} = \frac{x}{L}, \quad (2.5)$$

где x – координата вдоль сопла, исходящая из геометрического минимального сечения; L – длина расширяющейся части канала (72,5 мм). Измерение статического давления проводилось с помощью пароконмутатора ИДК-16.

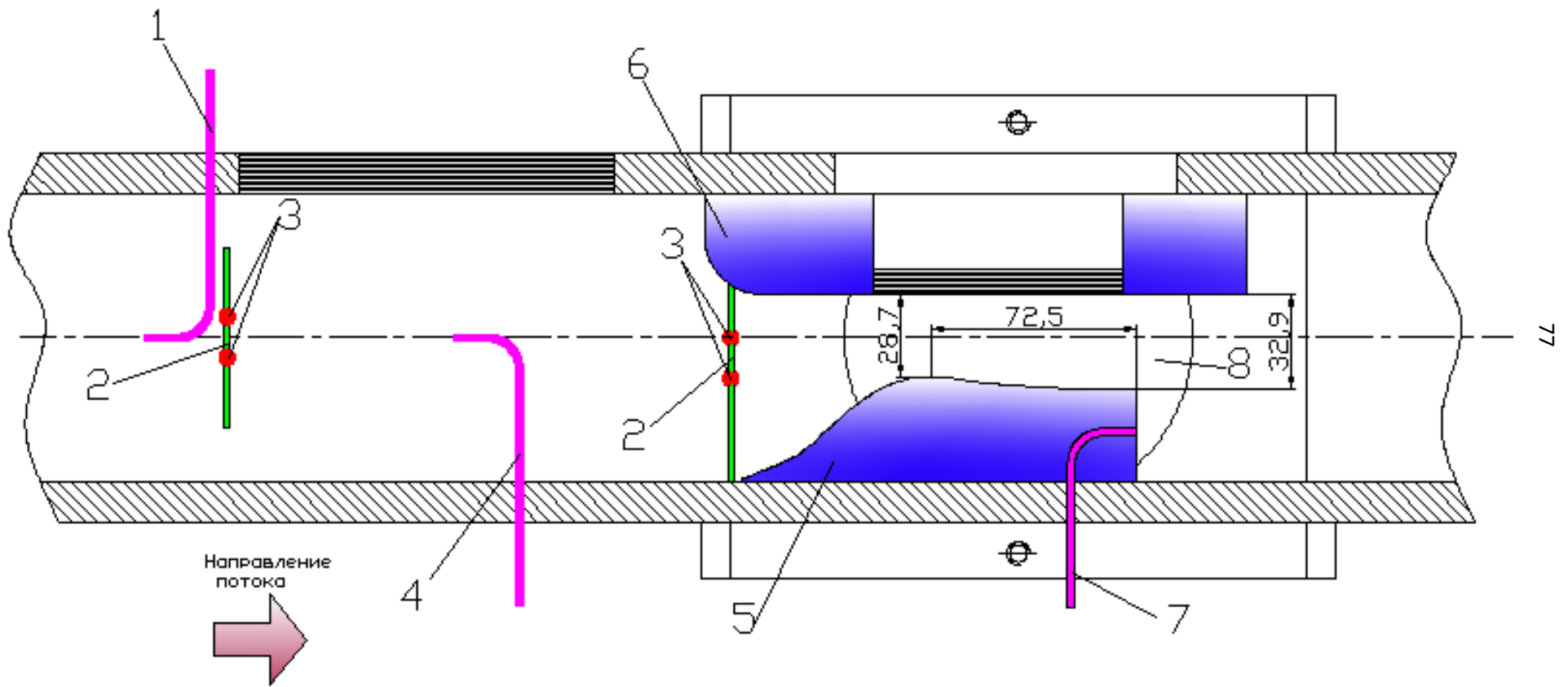


Рисунок 2.18.

Геометрические характеристики сопла Лавалья и схема рабочей части

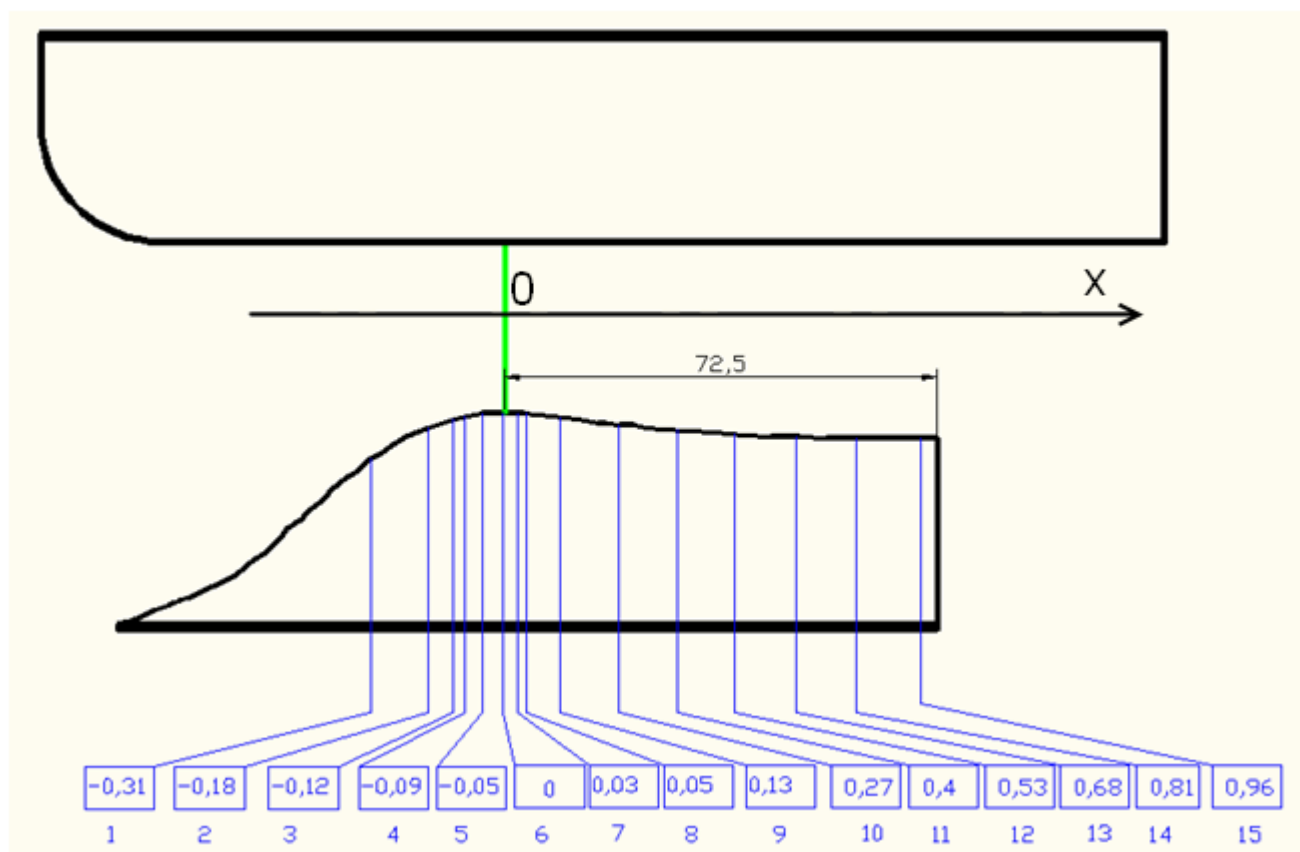


Рисунок 2.19.

Расположение дренажей для измерения статического давления на стенке

Принципиальная схема системы сепарации пленки с торцевой поверхности исследуемого канала через щели (позиция 2 на Рисунке 2.19) представлена на Рисунке 2.20. Отсос пароводяной смеси производился за счет создания в мерном баке (1) разрежения с помощью водоструйного эжектора (2). Величина перепада давления на щели регулировалась с помощью вентиля (3). Сепарируемая вода осаждалась в мерном баке, а пар поступал в смешивающую камеру эжектора, где происходил процесс его конденсации. Образовавшийся конденсат вместе с сетевой водой поступал в мерный бак (6). Представленная схема позволяет отдельно измерять расход как сепарируемой воды (путем его измерения в мерном баке 1), так и пара. Расход паровой фазы определялся исходя из уравнения теплового баланса. Для этого измерялась температура воды до эжектора (4) и после него (5), а также суммарный расход сконденсировавшегося пара и воды в мерном баке (6).

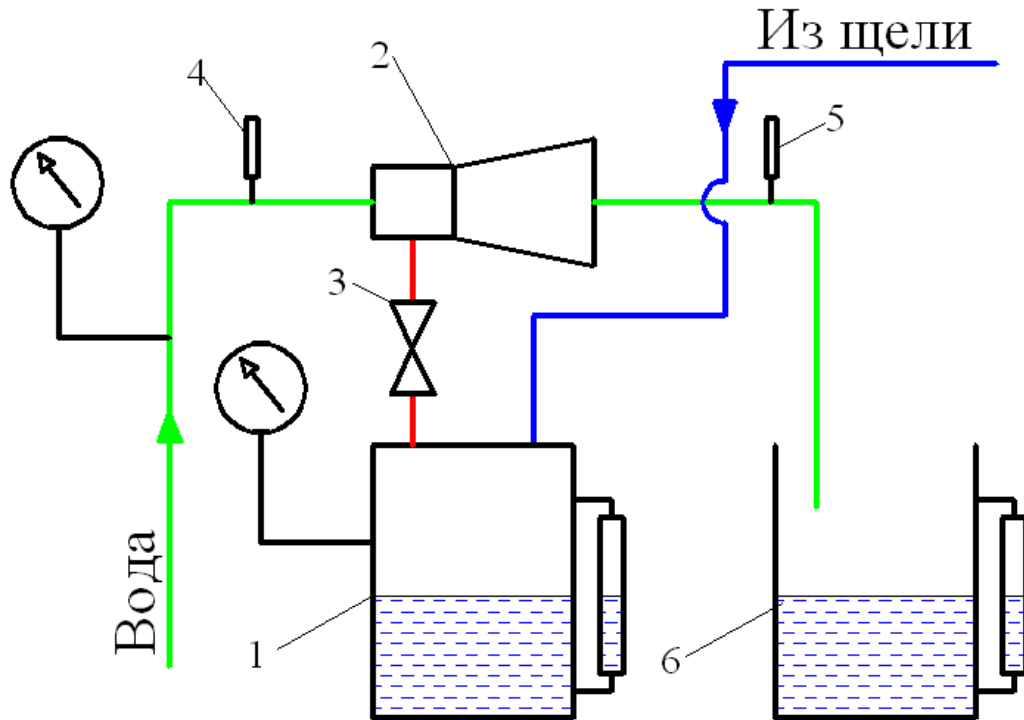


Рисунок 2.20.

Схема сепарации пленки с торцевой поверхности рабочей части

Перепад давления на щель подбирался таким образом, чтобы расход паровой фазы был минимальным, а отсасывалась бы в основном только водяная пленка на стенке канала. Тем самым достигалась минимизация вводимых в поток возмущений, создаваемых вследствие сепарации.

Для проведения апробации разрабатываемой в данной работе методики бесконтактного определения размеров капель (задача 3 в Главе 1) производились исследования в плоском суживающемся сопле, геометрия которого представлена на Рисунке 2.21. Канал образован двумя вставками (1, 2); в верхней вставке установлено оптическое стекло (3), которое позволяет заводить лазерный нож (8) системы лазерной диагностики в канал. В боковой стенке канала также предусмотрено отверстие для стекла (4), которое формирует область оптических наблюдений. Через нее производится фотосъемка засвеченных лазером капель.

Для верификации разрабатываемой методики производилось измерение размеров капель с помощью зонда инерционного осаждения капель (см. Рисунок 2.15). Для обеспечения его ввода в поток, на боковой стенке канала, которая расположена напротив зоны оптических наблюдений, просверлено 6 отверстий (5). Для контроля распределения параметров течения в сопле, нижняя вставка канала (2) продренирована с целью измерения статического давления потока. Для определения статического давления использовался парокуммутатор ИДК-16.

С поверхности оптического стекла с целью обеспечения качественных фотоснимков производилось удаление водяной пленки с боковой стенки канала через специально организованную щель (6) непосредственно перед стеклом (4). Сепарация производилась по схеме, которая была описана выше (см. Рисунок 2.20). Для контроля дисперсного состава жидкой фазы перед каналом, в боковой стенке рабочей части организовано отверстие (7), которое обеспечивает ввод зонда инерционного осаждения капель в поток. Контроль начальных параметров пара производился с помощью зондов давления полного торможения (9) и температуры полного торможения (10). Для предотвращения колебаний параметров потока в канале, рассматривались режимы с установлением критического характера течения в минимальном сечении сопла.

На Рисунке 2.22 зеленым цветом закрашена зона, которая будет рассматриваться при проведении измерений скоростей жидкой фазы с помощью системы лазерной диагностики. Возможности системы «Полис» позволяют получить векторные поля дискретной фазы во всей плоскости канала. Однако в данном случае необходимости в этом нет, так как суживающееся сопло используется для апробации разрабатываемой методики и векторное поле скоростей необходимо определять только в зоне замеров размеров капель с помощью зонда инерционного осаждения. Внутри этой узкой области расположены отверстия для ввода зонда (пронумерованы от 1 до 6 на Рисунке 2.22). Их положение относительно продольной оси x , началом координат которой является вход в канал, представлено в Таблице 2.

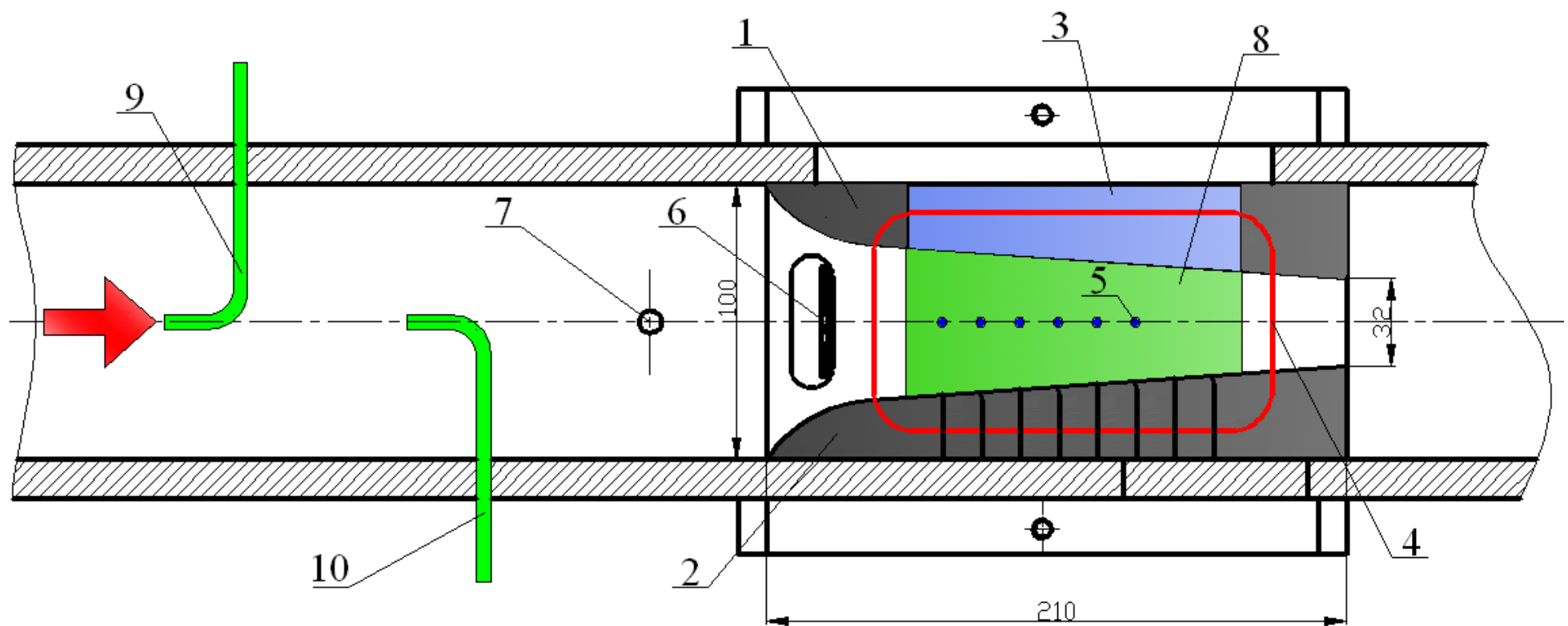


Рисунок 2.21.

Схема проточной части суживающегося сопла

На Рисунке 2.22 отмечены дополнительные данные о геометрии вставок, образующих канал, а также отображено расположение дренажей для измерения статического давления вдоль канала.

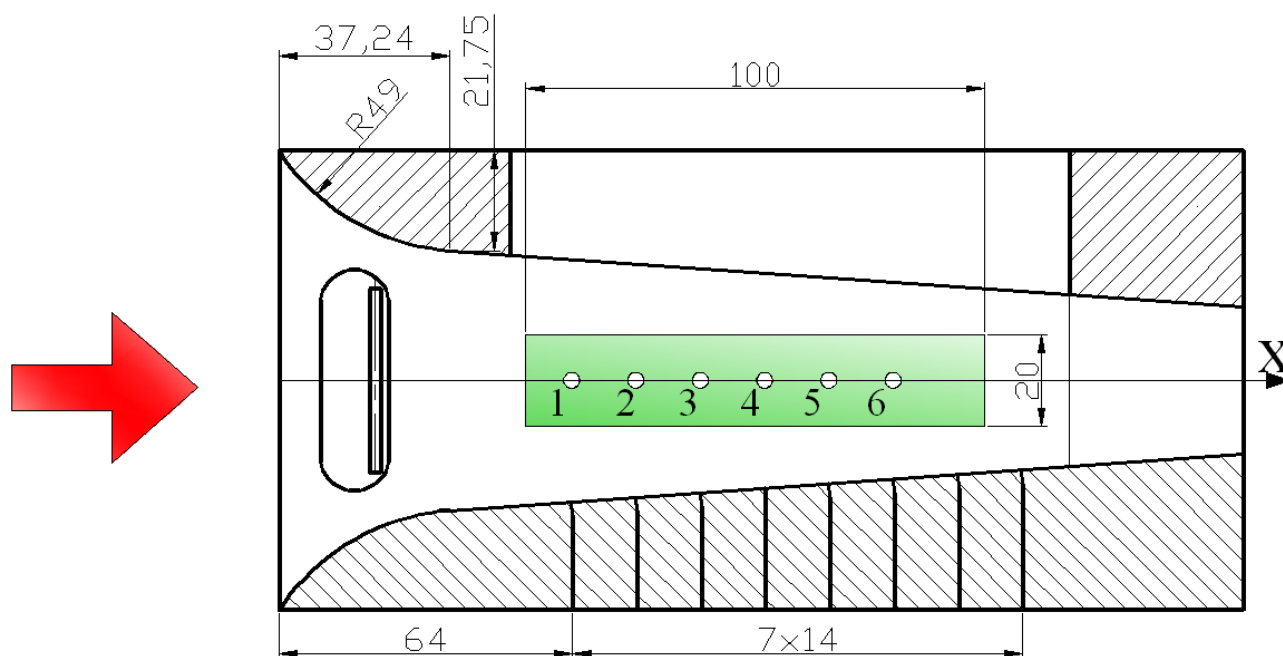


Рисунок 2.22.

Схема измерений в суживающемся сопле

Таблица 2.

Расположение отверстий для ввода зонда инерционного осаждения

№ отверстия	1	2	3	4	5	6
х, мм	64	78	92	106	120	134

На Рисунке 2.22 отмечены дополнительные данные о геометрии вставок, образующих канал, а также отображено расположение дренажей для измерения статического давления вдоль канала.

Схема применения системы лазерной диагностики «ПОЛИС» для исследования векторных полей скоростей в исследуемом канале отображена на Рисунке 2.23. Световой нож, формируемый импульсным лазером, с помощью зеркала направляется через оптическое стекло в верхней вставке сопла (позиция

3 на Рисунке 2.21) и засвечивает частицы дискретной фазы, расположенные в его плоскости (позиция 8 на Рисунке 2.21). Получаемую картину через оптическое стекло на торцевой стенке рабочей части (позиция 4 на Рисунке 2.21) фотографирует скоростная камера, ось которой направлена перпендикулярно плоскости лазерного ножа. Таким образом, в среднем сечении канала с помощью корреляционного PIV алгоритма определяются векторное поле скоростей жидкой фазы.

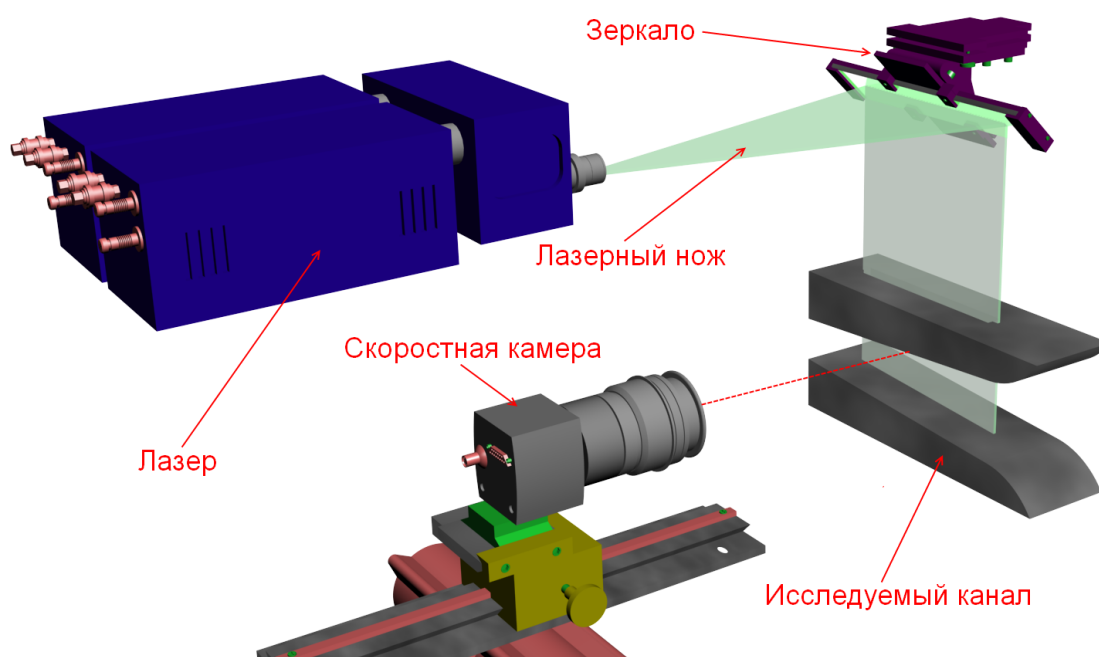


Рисунок 2.23.

Схема применения системы лазерной диагностики «Полис»

При выборе формы канала автор руководствовался следующими соображениями:

1. Необходимо обеспечить идеальные условия для проведения измерений с использованием PIV метода. То есть важно минимизировать негативные эффекты, связанные с наличием влажного пара в канале. Основным из них является формирование водяной пленки на поверхности оптического стекла, через которое производится съемка засвеченных трассеров. Практика применения системы лазерной диагностики [66, 67] показала, что водяная пленка в одиночных каналах начинает образовываться в области

безградиентного и диффузорного течения (например, в сопле Лавалья, представленном на Рисунке 2.19, на относительной координате 0,53 на стекле начинал формироваться бинарный водяной слой). Таким образом, необходимо организовать конфузорное течение влажного пара вдоль всего исследуемого участка сопла.

2. Как будет показано в Главе 3, разрабатываемая методика определения средних размеров капель работоспособна только в тех случаях, когда частицы жидкости двигаются с ускорением, а также их скорости отличаются от скоростей паровой фазы (вследствие скольжения). Для гарантированного обеспечения этого условия, также необходимо создание конфузорного характера течения вдоль всей исследуемой области.

3. Особенностью применения зонда инерционного осаждения является то, что он применим в узкой зоне чисел Маха, максимальное значение которого составляет 0,7 [31]. Таким образом, внутри исследуемой области (см. Рисунок 2.22) необходимо обеспечить приемлемый для данного метода режим течения потока. Предварительный газодинамический расчет с помощью таблиц газодинамических функций, а также с применением CFD-кода Ansys Fluent 14 показал, что в зоне замеров дисперсного состава капель значение числа Маха потока увеличивается от 0,4 до 0,5. Что позволяет использовать зонд инерционного осаждения капель в подобных условиях.

Решение задачи 4, поставленной в Главе 1, производилось на изолированной сопловой решетке. Кроме того, на этом объекте частично реализовывалась задача 2 (см. Главу 1). Рабочая часть для исследования плоских пакетов сопловых решеток представлена на Рисунке 2.24.



Рисунок 2.24.

Рабочая часть для исследования пакетов изолированных сопловых решеток

Геометрические характеристики межлопаточного канала представлены на Рисунке 2.25, а также в Таблице 3. Течение влажного пара рассматривалось в решетке, собранной из шести профилей, образующих 5 каналов. Исследования проводились в среднем канале, что минимизирует влияние границ плоского пакета.

Схема проточной части изображена на Рисунке 2.26. Поток влажного пара направляется в плоский пакет (1) сопловых лопаток посредством обтекателей (2, 3). В решетке он поворачивает и направляется в выхлопную трубу стенда КВП-2, после чего поступает в конденсатор. Для определения полей скоростей жидкой фазы за средним каналом лазерный нож (4) водится в поток с помощью лазерного зонда (5), установленного в задней стенке рабочей части. Фотосъемка засвеченных трассеров производится через оптическое стекло (6), расположенное в вырезе на бандаже пакета лопаток (1). Для минимизации негативного эффекта, связанного с наличием границ у плоской решетки (то есть для создания условия периодичности) за нижней лопаткой под углом выхода потока установлена направляющая пластина (7).

Сепарация водяной пленки со стенок подводящего канала осуществляется через щели 8. Схема отсоса была описана выше (см. Рисунок 2.20). Режим

течения контролировался с помощью зондов давления полного торможения (9) и температуры полного торможения (10) перед исследуемой решеткой. На выходе измерялось статическое давление через 9 дренажей (11), организованных на бандаже пакета с противоположной стороны от оптического стекла (6). Точки замера статического давления расположены вдоль шага решетки таким образом, что область измерений ограничена кромочными следами (на Рисунке 2.26 они схематично обозначены позицией 12) двух лопаток, образующих исследуемый канал.

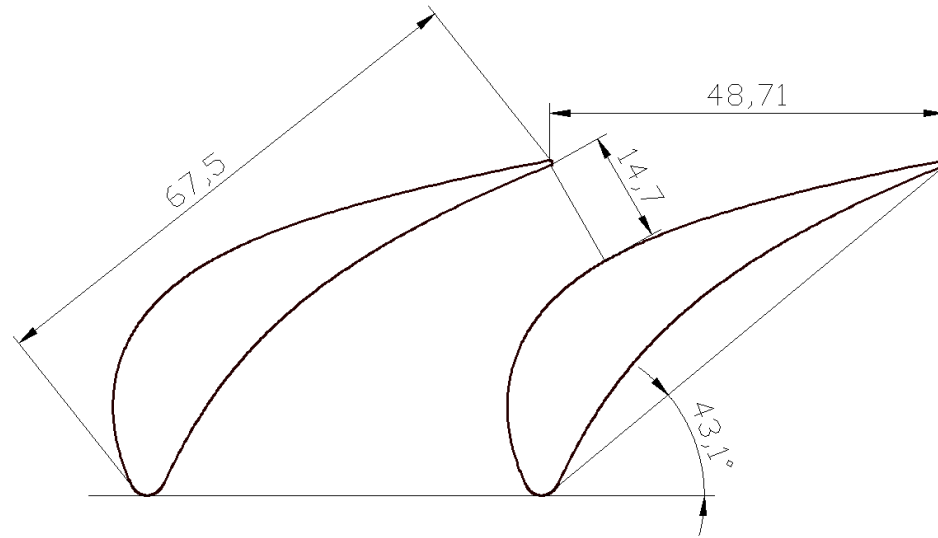


Рисунок 2.25.

Геометрические характеристики канала

Таблица 3.

Геометрические характеристики профиля сопловой лопатки и решетки

Ширина канала В, мм	Хорда профиля b, мм	Толщина кромки и $\Delta_{кр}$, мм	Шаг решетки t, мм	Относительный шаг, $t = t/b$	Угол выхода $\alpha_{1эф}$	Угол установки α_y	Минимальное сечение O_1 , мм	Относительная толщина кромки $\Delta_{кр} = \Delta_{кр}/O_1$	Высота лопатки l, мм
46,1	67,5	0,7	48,5	0,7	17,6	43,1	14,7	0,04	46,0

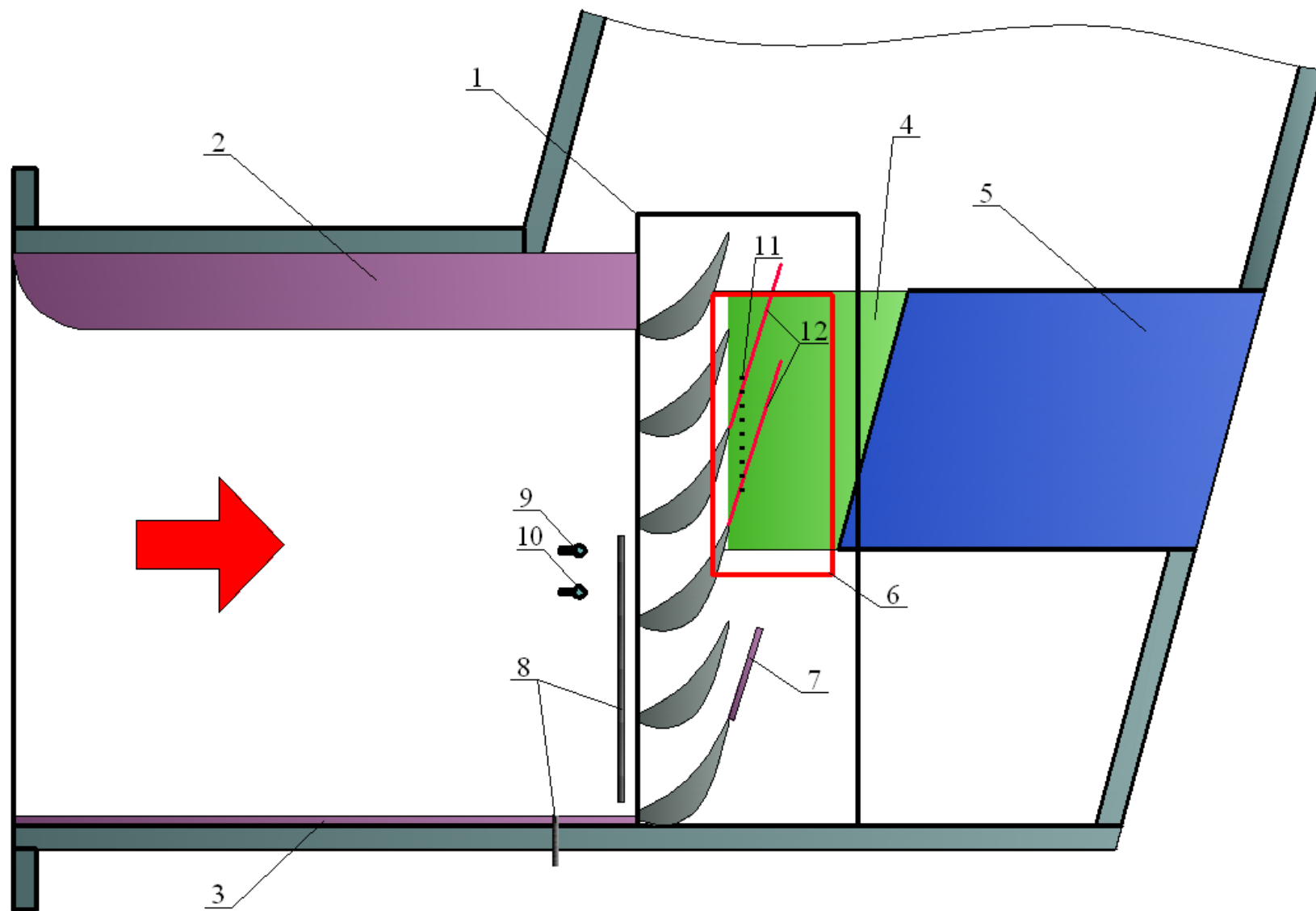


Рисунок 2.26.
 Схема проточной части

Более детально область исследуемого канала отображена на Рисунке 2.27. Измерение статического давления за решеткой вдоль шага, как уже было отмечено выше, производилось на боковой стенке рабочей части. Дренажи для замеров расположены на относительном расстоянии $\bar{z} = 0,1$, которое определялось по следующей формуле:

$$\bar{z} = \frac{z}{b}, \quad (2.6)$$

где z – расстояние от выходной кромки сопловой лопатки (вдоль оси z на Рисунке 2.27); b – хорда профиля лопатки. Осредненное значение статического давления паровой фазы использовалось для определения теоретического числа Маха за сопловой решеткой:

$$M_{1t} = \sqrt{\left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{2}{k-1}}, \quad (2.7)$$

где p – среднее статическое давление за решеткой; k – показатель изэнтропы (для влажного пара $k = 1,13$).

Также вдоль шага исследуемого канала на середине высоты лопатки производилось траверсирование давления полного торможения с целью определения профильных потерь кинетической энергии паровой фазы. Для этого использовался зонд давления полного торможения (обозначен синим цветом на Рисунке 2.27), который был установлен на координатное устройство, позволяющее перемещать его вдоль оси x (см. Рисунок 2.27). Траверсирование производилось на расстоянии $\bar{z} = 0,1$. Положение зонда вдоль шага (ось x на Рисунке 2.26) относительно выходной кромки нижней лопатки исследуемого канала изменялось в пределах шага в диапазоне $\bar{x} = 0,45 - 1,45$. Безразмерная величина \bar{x} определяется следующим образом:

$$\bar{x} = \frac{x}{t}, \quad (2.8)$$

где x – положение вдоль шага решетки (ось x на Рисунке 2.27); t – шаг решетки.

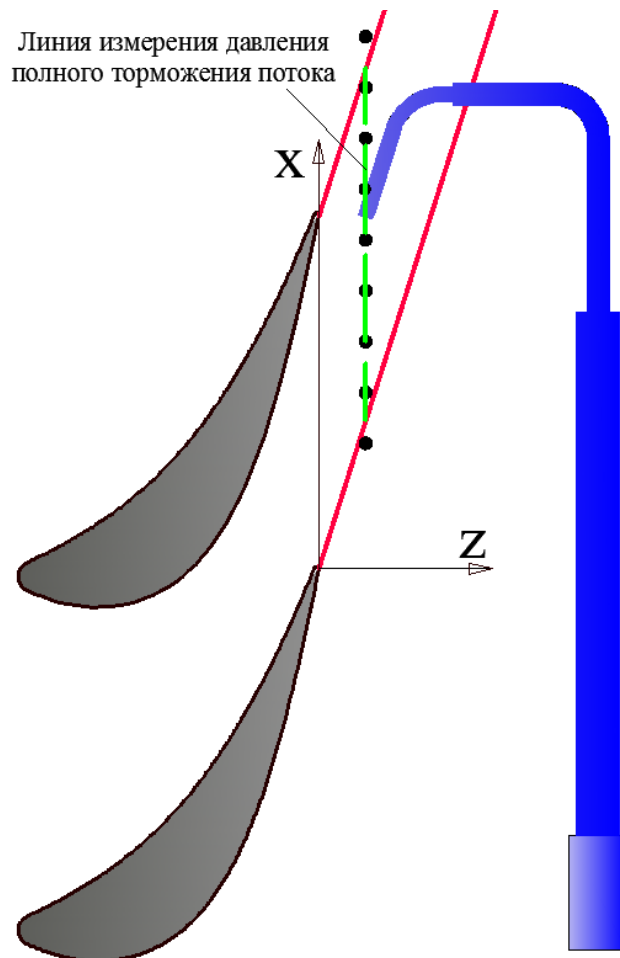


Рисунок 2.27.

Схема измерений исследуемого канала

Схема применения системы лазерной диагностики для определения полей скоростей жидкой фазы за исследуемой сопловой решеткой принципиально не отличается от компоновки, используемой при изучении течения влажного пара в суживающемся сопле. Основным отличием является то, что в случае с решеткой лазерный нож вводился через специальный зонд (позиция 5 на Рисунке 2.26), который был расположен в задней стенке рабочей части, а не сверху, как в случае с одиночным каналом. Подобная модификация схемы связана с требованием минимизировать расстояние, на которое распространяется лазерный нож в двухфазной среде. По мере распространения в потоке влажного пара, луч света рассеивается. Это приводит к ухудшению качества получаемых снимков засвеченных частиц дискретной фазы. На

Рисунке 2.28 представлена схема применения системы «Полис» при исследовании сопловой решетки.

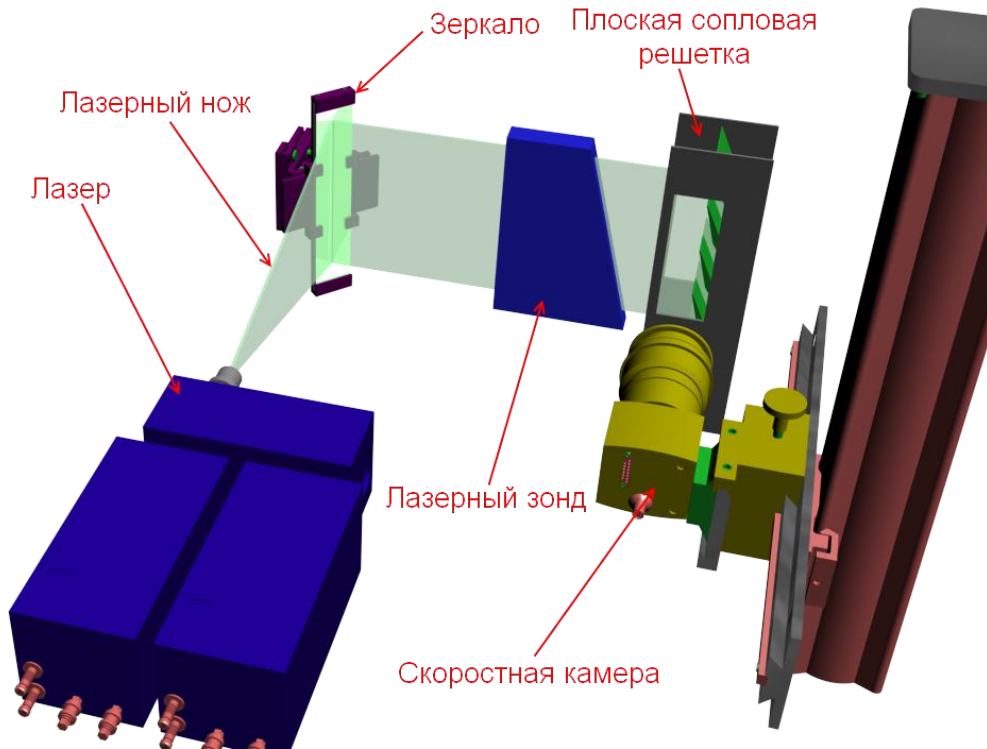


Рисунок 2.28.

Схема применения системы лазерной диагностики

2.1.7. Методика измерения параметров течения влажно парового потока

Исследование процессов, протекающих в рассматриваемых каналах, проводилось при изменении начального состояния пара (перегрев выше температуры насыщения, насыщенный и влажный пар) и при различных режимах течения (дозвуковой и сверхзвуковой).

Как отмечалось в разделе 2.1.1, величина перегрева пара выше температуры насыщения устанавливалась за счет изменения расхода питательной воды, подаваемой в первую и вторую ступени увлажнения (см. позиции 9, 10 на Рисунке 2.1). Перед исследуемым каналом формировалась равновесная среда с начальным состоянием, лежащим выше линии насыщения или на ней. Температура полного торможения (T_0) перед объектами

исследования, как отмечалось выше, измерялась с помощью зонда, в котором была установлена термопара КТХК02.01-С10-И-1,0-1000/2000 (см. раздел 2.1.2), передающая сигнал на измерительный комплекс МІС-300М. Значение начального перегрева пара выше температуры насыщения определялось следующим образом:

$$\Delta T_0 = T_0 - T_s(p_0), \quad (2.9)$$

где T_0 – температура торможения на входе в канал; $T_s(p_0)$ – температура насыщения при давлении полного торможения пара перед каналом p_0 .

При изменении степени влажности пара перед соплом (см. раздел 2.1.1), давление на коллекторе питательной воды поддерживалось постоянным, что обеспечивало неизменность расхода охлаждающей жидкости в первую и вторую ступени увлажнения. Необходимым условием подобия между исследуемыми течениями влажного пара является постоянство дисперсного состава среды перед каналом при изменении начальной степени влажности. Для этого массовая составляющая жидкой фазы в основном потоке увеличивалась за счет включения дополнительной форсунки с тем же давлением питательной воды на ней, а не за счет увеличения расхода питательной воды на одну форсунку. Таким образом, обеспечивалась неизменность дисперсного состава жидкой фазы, а средний диаметр капель в потоке перед соплом поддерживался в диапазоне от 26 до 30 мкм. Значение начальной степени влажности определялось по уравнению массового баланса:

$$y_0 = \frac{G_{пв} - G_{мб3}}{G_k + G_{мб1}}, \quad (2.10)$$

где y_0 – начальная степень влажности пара; $G_{пв}$ – расход питательной воды на форсунки; $G_{мб3}$ – расход конденсата, оседающего в баке ресивере стенда КВП-2; $G_{мб1}$ – расход конденсата, оседающего за рабочей частью; G_k – расход конденсата, образованного в конденсаторе, определяемый с помощью мерного бака.

Изменение режима течения при неизменности давления полного торможения пара перед исследуемым каналом производилось за счет

регулирования давления в конденсаторе с помощью ухудшения или улучшения вакуума, поддерживаемого эжектором. Таким образом, варьировалось значение статического давления за исследуемым каналом p_a , вследствие чего изменялась величина теоретического числа Маха.

2.2. Методика расчетных исследований

2.2.1. Математическая модель расчета

Для расчётов течения влажного пара в рассматриваемых объектах использовался CFD код Ansys Fluent 14 со встроенной в нем математической моделью влажного пара (Wet – steam model).

Решается система уравнений, включающая в себя уравнение неразрывности, а также уравнения сохранения количества движения (осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса) и энергии. При численном моделировании используется density based решатель, который с помощью метода конечных объемов производит расчет. Система уравнений в интегральной матричной форме для контрольного элемента объемом V и площадью поверхности dA имеет вид [91]:

$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] dA = \int_V H dV, \quad (2.11)$$

где $Q = \{p, u, v, w, T\}^T$; здесь p - давление среды; u, v, w - скорости потока вдоль трех пространственных координат; T - температура потока. Матрица $\frac{\partial W}{\partial Q}$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial W}{\partial Q} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_p H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

где ρ - плотность потока; ρ_p - частная производная плотности по давлению при постоянной температуре; ρ_T - частная производная плотности по температуре при постоянном давлении; C_p - изобарная теплоемкость; $\delta = 1$. В уравнении (2.11) вектор $F = \{\rho C, \rho C u + p \hat{i}, \rho C v + p \hat{j}, \rho C w + p \hat{k}, \rho C E + p C\}^T$, где C -

скорость потока; E - удельная полная энергия. В уравнении (2.11) вектор $G = \{0, \tau_{xi}, \tau_{yi}, \tau_{zi}, \tau_{ij} + q\}^T$, где τ - тензор вязких напряжений; q - тепловой поток. В уравнении (2.11) вектор H содержит дополнительные члены уравнения, такие как объемные, массовые силы, источники тепловой энергии и так далее. Для учета эффектов вязкости и турбулентного перемешивания система (2.11) замыкается дополнительными эмпирическими уравнениями, которые описывают модель турбулентности. Об этом более подробно будет описано в Главе 3.

Модель математического описания влажно парового потока, используемая в данной работе, позволяет рассчитывать течение влажного пара, сопровождающееся неравновесными процессами, и основана на следующих допущениях:

- Скольжение между каплями воды и паром пренебрежимо мало.
- Взаимодействием между каплями пренебрегается.
- Максимальная степень влажности 20 %.
- В связи с тем, что размеры капель малы, допускается, что объём жидкой фазы незначителен.

Подобные упрощения, как отмечалось в Главе 1, позволяют представлять течение влажного пара как движение смеси двух сред – газовой и жидкой. Уравнение, описывающее основные термодинамические характеристики течения, было представлено в Главе 1 (см. уравнение 1.7). Для учета наличия влаги в потоке система (2.11) дополняется двумя уравнениями переноса [106]. Первое из них описывает величину влажности:

$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} + \text{div}(\rho C \beta) = \Gamma, \quad (2.13)$$

где β - влажность; Γ – масса сконденсировавшегося пара и испарившейся воды в единице объема за единицу времени. Второе уравнение описывает изменение концентрации капель в потоке:

$$\frac{\partial \rho \eta}{\partial t} + \text{div}(\rho C \eta) = \rho I, \quad (2.14)$$

где η – концентрация частиц дискретной фазы в единице объема; I – количество образующихся (исчезающих) частиц на единицу объема за единицу времени. Количество капель в единице объема определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\beta}{(1-\beta)V_d\left(\frac{\rho_B}{\rho_{II}}\right)}, \quad (2.15)$$

где ρ_B – плотность воды; ρ_{II} – плотность пара при заданных параметрах; V_d – объём одной капли, который определяется следующим образом:

$$V_d = \frac{4}{3}\pi r_d^3, \quad (2.16)$$

где r_d – средний радиус капель.

Уравнения (2.13) и (2.14) дополняются выражениями для определения величин I и Γ на основе классической неизотермической модели конденсации [91].

2.2.2. Расчетные схемы исследуемых объектов

Для создания расчетных схем, определяющих геометрии рассматриваемых каналов, использовался сеточный генератор Ansys ICEM CFD. В целях повышения качества используемых сеток, применялся блочный подход. Создаваемые расчетные схемы являются двухмерными, а их ячейки представляют собой прямоугольники, углы которых максимально близки к 90° . Для наиболее точного моделирования процессов в пристеночных зонах потока (пограничных слоев), вокруг твердых поверхностей создавалась густая сетка. Ее параметры были выбраны таким образом, что величина y^+ непосредственно на стенке не превышала 1.

На Рисунке 2.29 представлена расчетная сетка, используемая для моделирования процессов, протекающих в сопле Лавая (см. Рисунки 2.18 и 2.19). Она состоит из 206508 квадратичных ячеек. Наиболее мелкие элементы сетки сконцентрированы в пристеночной области и непосредственно в самом канале в расширяющейся части, где будут формироваться скачки уплотнения на нерасчетных режимах работы сопла, а также скачки конденсации вследствие неравновесных процессов конденсации.

На Рисунке 2.30 представлена расчетная сетка, используемая для расчета течения в суживающемся канале (см. Рисунки 2.21, 2.22). Она состоит из 27146 квадратичных ячеек.

На Рисунке 2.31 представлена расчетная сетка, используемая для моделирования процессов в плоской изолированной сопловой решетке (см. Рисунки 2.25 – 2.27). Она состоит из 34145 квадратичных ячеек. Межлопаточный канал сформирован непосредственно самой лопаткой (граничное условие стенка) и периодическими границами, которые обеспечивают бесконечную плоскую решетку.

Важно отметить, что количество ячеек в представленных расчетных сетках (кроме сетки сопла Лаваля, в которой было задано заведомо большое количество ячеек) выбралось расчетным путем. Вначале создавалась расчетная область с малым количеством элементов, на которой производилось моделирование, затем число ячеек увеличивалось (то есть уменьшались их размеры) и производился повторный расчет. Эти действия повторялись до тех пор, пока изменение густоты сетки не переставало влиять на результаты численного моделирования. Таким образом, на Рисунках 2.30 и 2.31 представлены окончательные варианты расчетных схем, которые имеют оптимальное количество элементов.

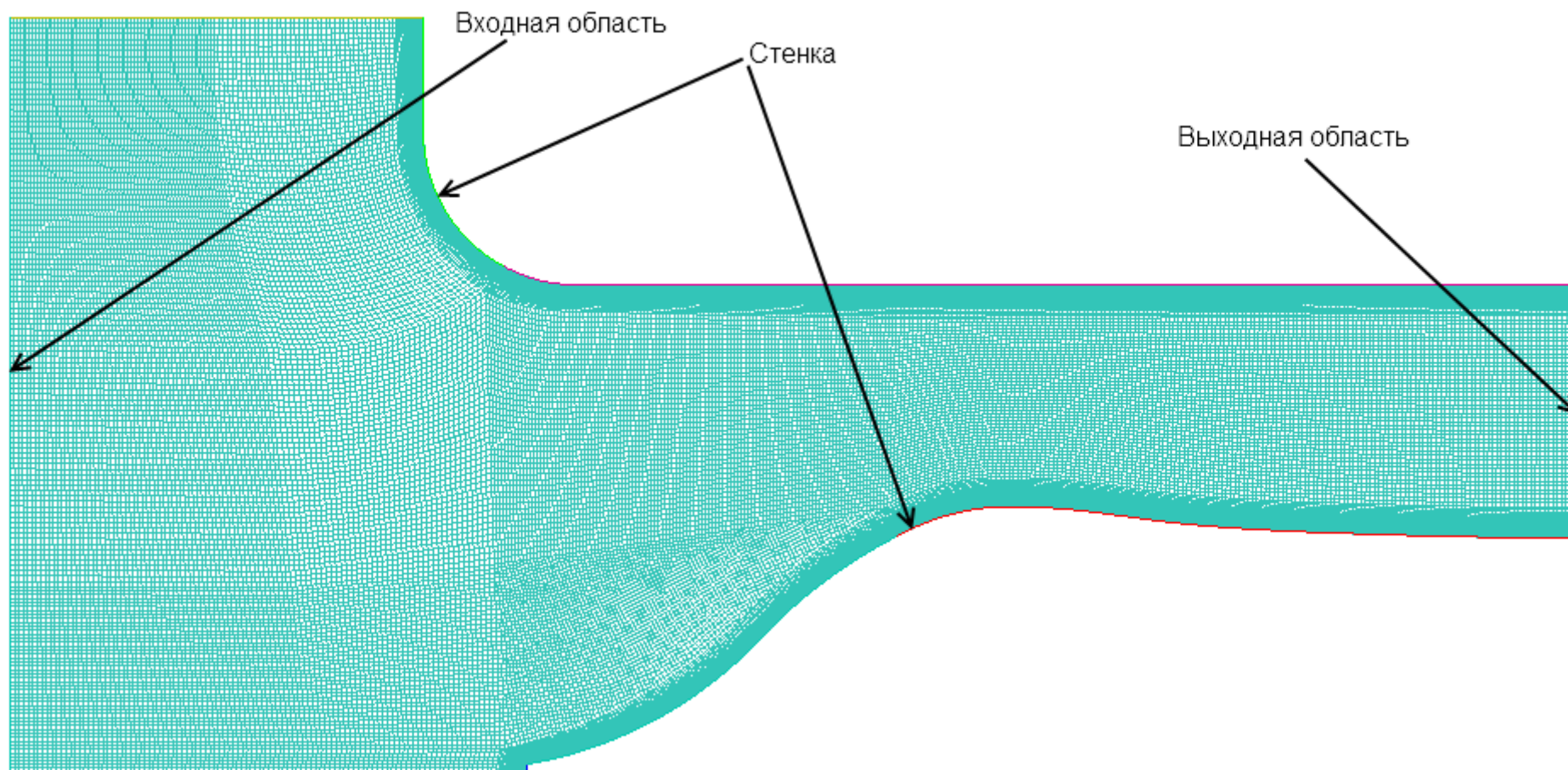


Рисунок 2.29.
Расчетная сетка сопла Лавалья

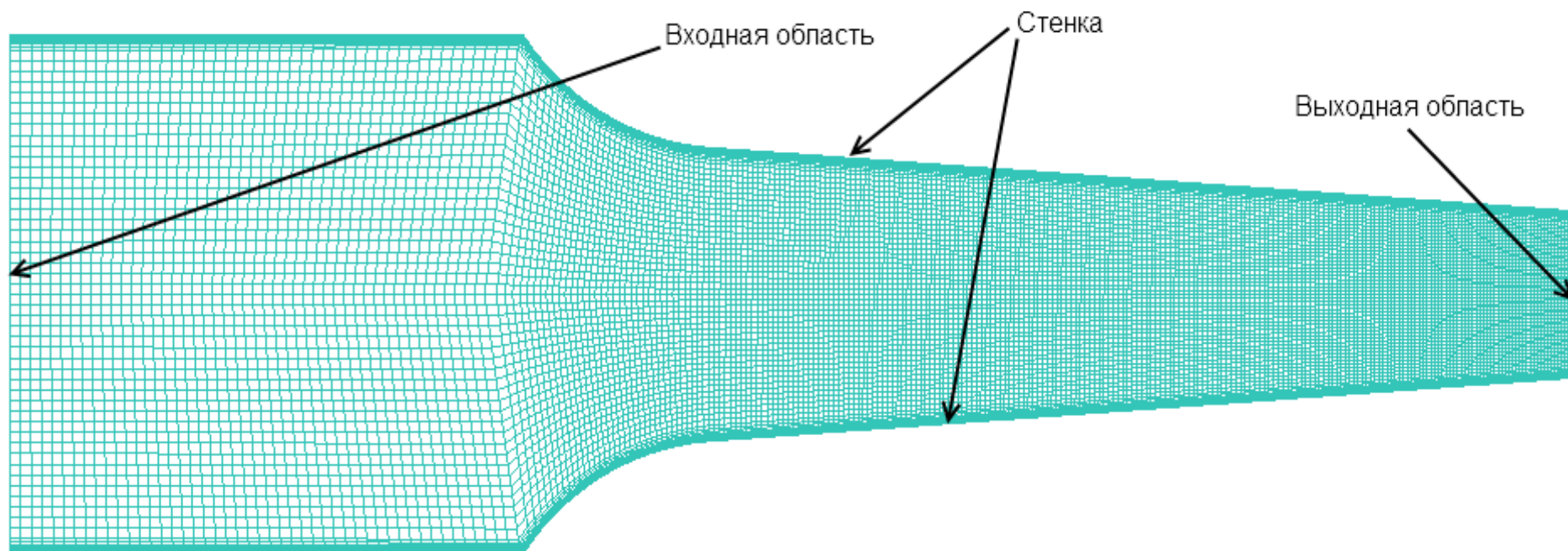


Рисунок 2.30.

Расчетная сетка суживающегося сопла

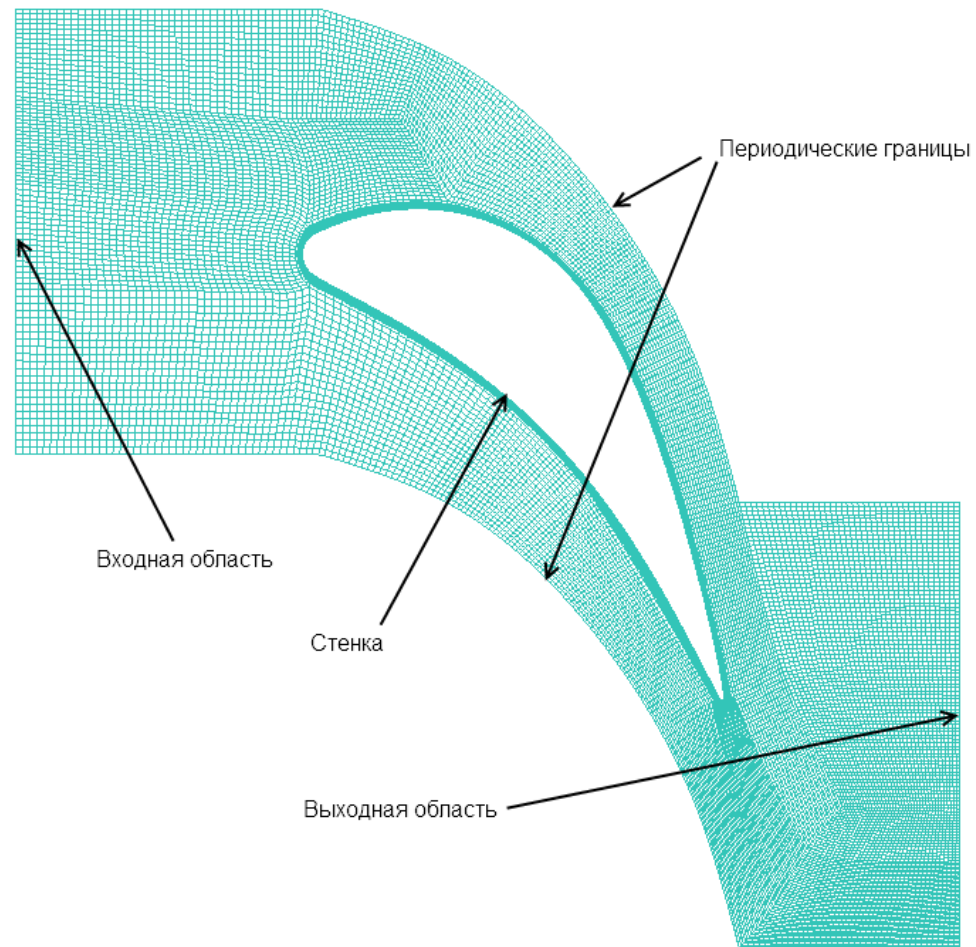


Рисунок 2.31.

Расчетная сетка плоской изолированной сопловой решетки

2.2.3. Порядок проведения численного моделирования

В качестве граничных условий на входе помимо давления полного торможения, температуры полного торможения и параметров турбулентности задаются параметры жидкой фазы: влажность и десятичный логарифм от количества капель в единице объема. На выходе задается величина статического давления.

Параметры турбулентности на входе включают в себя кинетическую энергию турбулентности k и рассеивание энергии турбулентности ϵ . В настоящей работе не производилось измерение турбулентных характеристик потока перед исследуемым объектом. Поэтому, для оценки этих величин использовались выражения, рекомендованные в [91] и характерные для небольших значений степени турбулентности (что отвечает состоянию потока перед исследуемым объектом на данном стенде). Кинетическую энергию турбулентности можно определить по следующей формуле:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{U}I)^2, \quad (2.17)$$

где \bar{U} - средняя скорость потока на входе; I – степень турбулентности, которая равна:

$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}}. \quad (2.18)$$

Для определения числа Re в качестве характерного размера берётся высота входной области. Значение рассеивания энергии турбулентности определяется как:

$$\epsilon = \frac{0.164k^{1.5}}{l}, \quad (2.19)$$

где l – характерная длина турбулентности (размер наиболее крупных вихрей в потоке). Существует приближенная зависимость этого параметра от характерного размера входной области расчетной схемы:

$$l = 0.07L, \quad (2.20)$$

где L – высота входной области. Зависимость (2.20) позволяет получить только приближенное представление о размерах вихрей турбулентного потока. Однако

на большинство моделей турбулентности данный параметр практически не влияет, что позволяет использовать данную формулу в качестве расчётной.

Расчеты производились в двух приближениях. После схождения задачи в первом приближении (first-order upwind discretization) проводился окончательный расчёт потока пара во втором приближении (second – order upwind discretization). Условиями сходимости расчета были:

- Величина всех невязок меньше 10^{-3} .
- Среднеинтегральная скорость потока на выходе из расчетной схемы не изменяется при последующих итерациях.
- Среднеинтегральная влажность на выходе из расчетной схемы не изменяется при последующих итерациях.
- Невязка по расходу на входе и выходе не более 1%.

Выполнение всех 4 условий сходимости обеспечивает результат, который довольно точно соответствует реальной картине течения. Необходимо отметить, что чем выше начальная влажность пара перед исследуемым каналом, тем сложнее сходимость задачи. Поэтому, в процессе расчёта, максимальная влажность потока лимитировалась величиной, которая соответствует влажности пара в конце изоэнтропического расширения до заданного давления на выходе.

Глава 3. Разработка методики бесконтактного определения средних размеров крупной влаги

Как отмечалось в Главе 2, результатом работы PIV алгоритма является мгновенное поле скоростей трассеров, движущихся в потоке. Применение данного корреляционного метода в условиях полидисперсной двухфазной среды позволяет использовать его для анализа размеров капель в канале.

При движении капли в паровом потоке на нее действуют силы разнообразной природы (см. Главу 1), которые способствуют изменению ее скорости при скольжении относительно основной фазы. Как следствие, процесс разгона или торможения влаги различного размера отличается по своему характеру.

Таким образом, анализируя характер эволюции скорости частиц жидкости вдоль их траекторий, и рассматривая силы, действующие на них, можно судить о размерах капель. Мгновенные поля скоростей, полученные PIV методом, несут информацию только о векторе скорости влаги в конкретной точке пространства и не отображают изменение скоростных характеристик (модуля скорости, угла направления движения, ускорении) отдельной капли. Применение метода статистического анализа [57], с помощью которого обрабатывается набор из мгновенных полей, позволяет получить осредненное поле скоростей влаги. На основании этих данных, можно судить о характере движения капель средних размеров в потоке. Под средним диаметром в данной работе будет подразумеваться осредненное значение размера капли, определенное по концентрации.

При этом необходимо подчеркнуть, что полученное поле скоростей относится к дискретной среде, поэтому, для корректной интерпретации данных, важно четко выделять источники формирования капель и производить анализ, опираясь на области их проявления.

В данной Главе описана, методика бесконтактного определения средних размеров капель. Этот метод основывается на экспериментальном измерении скоростных характеристик жидкой фазы (PIV алгоритм) и расчете параметров

основного потока, выполняемом с применением расчетного CFD-кода Ansys Fluent 14.

3.1. Уравнение движения капли в потоке

Приведенная методика основывается на расчете уравнения движения капли вдоль ее траектории, полученной из статистически осредненного поля скоростей жидкой фазы.

Основные допущения, сделанные в данной работе:

1. Предполагается, что капли имеют сферическую форму. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют учесть процесс деформации частиц жидкости под действием внешних сил [54]. Однако, как показано в работе [43], максимальная погрешность расчета скоростей капель без учета деформации составляет 5%. Стоит также отметить, что на данный момент отсутствует полная картина процессов деформации частиц в спутном потоке.

2. Предполагается, что из всех сил, действующих на каплю (см. Главу 1), наибольшее влияние на характер ее движения оказывает сила аэродинамического сопротивления, воздействующая со стороны основного потока. При тчении влажного пара, параметры которого соответствуют параметрам в последних ступенях паровых турбин, $\rho_n \ll \rho_v$ (где ρ_n - плотность паровой фазы; ρ_v - плотность жидкой фазы). Таким образом, в межфазном взаимодействии можно пренебречь силами, обусловленными градиентом давления в газе и эффектом «присоединения масс» [61, 86, 43, 38, 82, 129].

3. Предполагается, что величина аэродинамического сопротивления сферической частицы остается постоянной при изменении рассогласования между направлением движения основного потока и капли. Этот вопрос на данный момент практически не изучен, что связано со сложностью проведения экспериментальных исследований.

4. Предполагается, что обратное механическое воздействие капель (особенно крупных) на паровой поток минимально и им можно пренебречь. В ряде работ, в которых рассматривается движение крупных частиц в потоке (размеры капель превышают 1 мкм) [6, 114, 130], показано, что влияние

крупнодисперсной влаги на потери кинетической энергии паровой фазы минимально и составляют меньше 1%.

Определение средних размеров капель в потоке основано на решении уравнения движения частицы вдоль ее траектории. С учетом выше описанных допущений, уравнение движения капли имеет следующий вид (второй закон Ньютона относительно инерциальной системы отсчета):

$$\vec{P}_a = m_k \vec{a}_k, \quad (3.1)$$

где P_a - сила аэродинамического сопротивления капли; m_k - масса капли; a_k - ускорение капли. Сила аэродинамического сопротивления определяется следующим образом:

$$\vec{P}_a = \frac{1}{2} A_k C_x \rho_n |\vec{c}_n - \vec{c}_k| (\vec{c}_n - \vec{c}_k), \quad (3.2)$$

где A_k - площадь поперечного сечения капли (в плоскости, нормальной к направлению движения газа); C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления капли; c_n - скорость паровой фазы; c_k - скорость жидкой фазы. Величина массы капли:

$$m_k = \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} \rho_k, \quad (3.3)$$

где d - диаметр частицы. Важной характеристикой, влияющей на точность расчета, является величина коэффициента аэродинамического сопротивления. В общем случае C_x определяется рядом факторов и в первую очередь относительным числом Re_k для капли:

$$Re_k = \frac{\rho_n (c_n - c_k)}{\mu_n} d, \quad (3.4)$$

где μ_n - динамическая вязкость. Помимо числа Re_k на величину коэффициента аэродинамического сопротивления существенно влияют соотношение плотностей фаз (ρ_v/ρ_n) и сжимаемость несущей среды [39, 103]. Влияние сжимаемости несущей фазы оценивается следующим выражением [94]:

$$f(M) = \frac{C_x}{C_{x0}} = \frac{1 + e^{-\frac{0,427}{M^{4,63}} \frac{3}{Re_k}}}{1 + \frac{M}{Re_k} \left[3,82 + 1,28 e^{-1,25 \frac{Re_k}{M}} \right]}, \quad (3.5)$$

где C_{x0} - коэффициент сопротивления без учета сжимаемости среды; C_x - коэффициент сопротивления с учетом сжимаемости основного потока; M – число Маха. Окончательное выражение для определения величины C_x можно записать в следующем виде:

$$C_x = C_{x0}f(M). \quad (3.6)$$

В области чисел $10 < Re_\kappa < 1000$, характерных для движущихся в проточной части турбины капель, влияние ρ_v/ρ_π на коэффициент сопротивления капли практически не влияет. Таким образом, в качестве определяющих характеристик величины C_x в работе используются Re_κ и M . В расчете применяются данные по коэффициенту сопротивления, полученные при исследовании обтекания шара несжимаемым изотермическим потоком газа. На данный момент существует большое количество аналитических зависимостей, аппроксимирующих эти экспериментальные данные. В данном случае используется подход, предложенный в [113]:

$$C_{x0} = A_1 \frac{1}{Re_\kappa} + A_2 \frac{1}{Re_\kappa^2} + A_3. \quad (3.7)$$

Коэффициенты в уравнении 3.7 определяются величиной числа Re_κ :

$$Re_\kappa \leq 0,1 \Rightarrow A_1 = 24; A_2 = 0; A_3 = 0$$

$$0,1 < Re_\kappa \leq 1 \Rightarrow A_1 = 22,73; A_2 = 0,0903; A_3 = 3,69$$

$$1 < Re_\kappa \leq 10 \Rightarrow A_1 = 29,1667; A_2 = -3,8889; A_3 = 1,222$$

$$10 < Re_\kappa \leq 100 \Rightarrow A_1 = 46,5; A_2 = -116,67; A_3 = 0,6167$$

$$100 < Re_\kappa \leq 1000 \Rightarrow A_1 = 98,33; A_2 = -2778; A_3 = 0,3644$$

$$1000 < Re_\kappa \leq 5000 \Rightarrow A_1 = 148,62; A_2 = -475 \cdot 10^4; A_3 = 0,357$$

$$5000 < Re_\kappa \leq 10000 \Rightarrow A_1 = -490546; A_2 = 57,87 \cdot 10^4; A_3 = 0,46$$

$$10000 < Re_\kappa \leq 50000 \Rightarrow A_1 = -1662,5; A_2 = 5,4167 \cdot 10^6; A_3 = 0,5191$$

Основным достоинством выбранной зависимости, в отличие от «классической» [61, 88, 43, 38, 82, 130], является плавность перехода значений C_{x0} на границах Re_κ . Вид аппроксимирующей функции представлен на Рисунке 3.1.

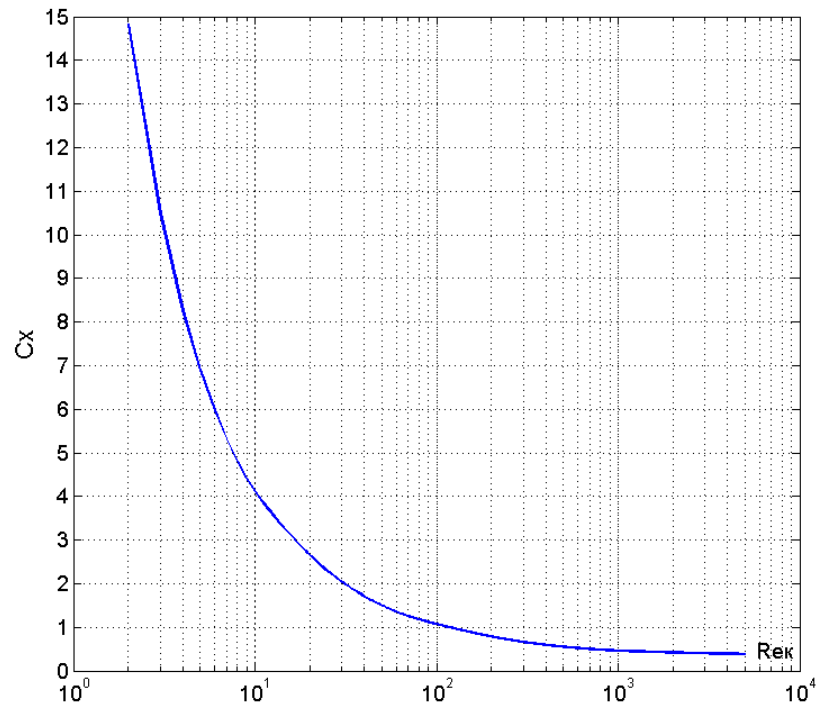


Рисунок 3.1.

Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от Re_k

3.2. Алгоритм определения средних размеров капель вдоль траекторий

Расчет нелинейного уравнения 3.1 (с учетом уравнений 3.2 – 3.7) производится численным методом Ньютона [5] относительно неизвестного размера капли вдоль ее траектории. Как видно из рассмотренных выражений, определить размер частицы представляется возможным только в случае наличия скольжения фаз, а также ускорения у частицы, что характерно для капель, размеры которых выше 5 мкм (крупнодисперсная влага) [43].

На Рисунке 3.2 представлена общая блок схема алгоритма расчета средних размеров капель во влажнопаровом потоке. Исходными данными являются:

1. Набор мгновенных полей скоростей жидкой фазы, определенных PIV методом.
2. Поле скоростей и основные термодинамические параметры паровой фазы (расчет с помощью CFD кода Ansys Fluent 14).



Рисунок 3.2.

Блок схема бесконтактного метода определения средних размеров капель

Мгновенные поля скоростей капель подвергаются пост обработке, в результате чего отсеиваются «выпадающие» вектора, в точках, где значения скорости частиц не определены. Вектора восстанавливаются исходя из интерполяции значений в ближайших точках. Метод пост обработки описан в разделе 3.3. Кроме того, для выявления областей проявления только крупных капель, производится фильтрация обработанных полей по коэффициенту скольжения:

$$\nu = \frac{c_k}{c_n}. \quad (3.8)$$

Данными о скоростях паровой среды являются результаты численного моделирования потока. В данной работе рассматриваются два типа капель:

- Мелкая влага – размеры меньше 5 мкм; капли движутся практически без скольжения по отношению к основному потоку и вдоль его линий тока.
- Крупная влага – размеры больше 5 мкм; проявляется скольжение фаз, углы выхода капель больше углов выхода парового потока.

Вектора, относящиеся к мелким каплям, отсеиваются: если их коэффициент скольжения больше некоторого значения ν , характерного для движения мелких капель в потоке с учетом погрешностей применения PIV метода и численного расчета потока (его величина может варьироваться в диапазоне 0,8 – 0,95 в зависимости от объекта исследования). Отсутствие подобной фильтрации может привести к некоторым нефизическим результатам, описанным в разделе 3.4.

После пост обработки мгновенных полей скоростей производится их статистическое осреднение встроенным в программный комплекс ActualFlow алгоритмом [57]. Затем осредненное поле скоростей подвергается удалению экспериментального «шума» и сглаживанию экспериментальных данных (см. раздел 3.3).

Полученные данные используются для определения траекторий движения капель (см. раздел 3.4), вдоль которых методом билинейной интерполяции определяются основные параметры фаз, необходимые для решения уравнения (3.1):

- Скорости капель (эксперимент) и пара (Fluent).
- Ускорение капель (эксперимент).
- Динамическая вязкость и плотность пара, плотность воды (Fluent).

Рассчитанная траектория является дискретным набором элементарных отрезков (разрешающая способность получаемых снимков позволяет добиваться разбиения траектории на отрезки длиной 0,5 – 1 мм). Предполагается, что на отдельном малом отрезке скорость изменяется линейно. Таким образом, ускорение капель в точке траектории в проекции на одну из осей определяется следующим образом:

$$a_{x1} = \frac{U_{x2} - U_{x1}}{\Delta t}, \quad (3.9)$$

где U_{x2} – скорость капли на следующей точке траектории; U_{x1} – скорость капли в рассматриваемой точке; Δt – время, прохождения каплей элементарного отрезка, которое, исходя из линейности изменения скорости, определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{x_2 - x_1}{\left(\frac{U_{x2} + U_{x1}}{2}\right)}, \quad (3.10)$$

где x_2 – координата следующей точки вдоль рассматриваемой оси; x_1 – координата рассматриваемой точки.

Имеющиеся данные позволяют найти решение уравнения (3.1).

Как отмечалось в Главе 1, в используемом программном обеспечении ActualFlow, реализующем корреляционный алгоритм PIV, отсутствуют методы анализа полидисперсных потоков. В связи с этим существует необходимость в разработке дополнительных методик обработки экспериментально определенных характеристик частиц жидкой фазы. В то же время имеющиеся в CFD коде Ansys Fluent математические модели требуют некоторой доработки для повышения точности и скорости проводимых расчетов.

3.3. Разработка методов пост обработки мгновенных полей скоростей в условиях двухфазного потока

Использование системы лазерной диагностики потоков «ПОЛИС» в условиях влажнопарового потока сопровождается некоторыми трудностями –

получаемые мгновенные фотоснимки засвеченных трассеров (капель) могут быть довольно низкого качества. Причинами этого служат ряд факторов:

1. Формирование водяной пленки на оптическом стекле (см. Рисунок 3.3). Образованная на стекле пленка препятствует прохождению света от засвеченных капель, делая некоторые области пространства за решеткой необработываемыми.

2. Интерференция лазерного луча. Лазерный нож, попадающий в рабочую часть через специально установленное стекло интерферирует из-за образовавшейся на окне неравномерной водяной пленки. Как следствие, получаемая картина оказывается неравномерно освещенной (см. Рисунок 3.3).

3. Наличие крупных капель в потоке в некоторых случаях приводит к локальной засветке изображения (см. Рисунок 3.3).

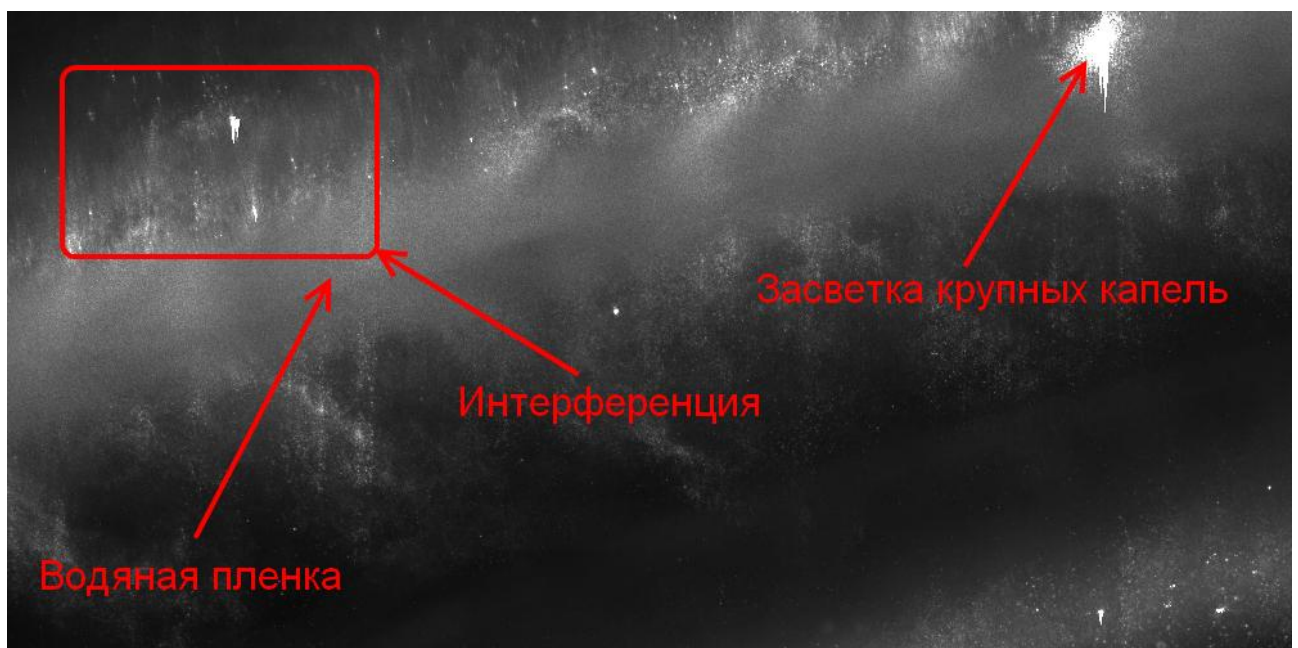


Рисунок 3.3.

Негативные эффекты, проявляющиеся при течении влажнопарового потока в канале

Наличие описанных явлений приводит к некорректному определению векторов скорости частиц жидкой фазы в области локализации данных

негативных эффектов – PIV метод либо не находит максимумов на корреляционной функции, либо выбирает неверный экстремум. Поэтому для получения достоверной картины движения капель в потоке необходимо проведение эффективной пост обработки мгновенных полей скоростей. Она включает в себя 3 этапа:

1. Локализация «выпадающих» данных.
2. Замена «выпадающих» и отсутствующих величин на корректные.
3. Удаление экспериментального шума из итогового результата.

Программное обеспечение ActualFlow, которое используется в настоящей работе, несет в себе инструментарий для выполнения только двух первых этапов постобработки. При этом, как показал опыт применения интегрированных в ActualFlow методов, в некоторых случаях (при больших значениях влажности или при малой относительной толщине выходной кромки) набора инструментов, оказывается недостаточно, чтобы получить корректные данные в условиях влажнопарового потока. Для решения этой проблемы в дополнение к встроенным алгоритмам был реализован метод пост обработки мгновенных полей скоростей.

Используемый алгоритм предложен в [99, 100]. Этот метод позволяет производить автоматизированную обработку данных, которая включает в себя все три этапа, описанных выше, в том числе такую важную часть постобработки как сглаживание экспериментального шума.

Сглаживание экспериментального шума производится следующим образом:

$$\hat{V} = IDCT(\Gamma \cdot DCT(V)), \quad (3.11)$$

где V – исходное поле скоростей, представляющее из себя две матрицы из декартовых составляющих скоростей $V = (V_x, V_y)$; \hat{V} – результирующее поле скоростей; DCT – дискретное двумерное косинусное преобразование; IDCT – обратное дискретное косинусное преобразование; знак "·" в данном случае обозначает поэлементное перемножение матриц; Γ – матрица фильтра, каждый элемент которой (k,l) определяется следующим способом:

$$\Gamma_{k,l} = \left[1 + s \left(4 - 2\cos\left(\frac{(k-1)\pi}{m}\right) - 2\cos\left(\frac{(l-1)\pi}{n}\right) \right)^2 \right]^{-1}, \quad (3.12)$$

где m и n – размерности матрицы (количество векторов вдоль горизонтальной и вертикальной декартовых осей). Выражение (3.12) содержит в себе положительную скалярную величину s , которая контролирует степень сглаживания исходного поля скоростей. Произвольный выбор значения для s может повлечь за собой существенное искажение экспериментальных данных. Чтобы это предотвратить используется метод оценки параметра сглаженности с помощью метода обобщенной перекрестной валидации [100].

Для реализации процесса удаления выпадающих векторов выражение (3.11) несколько видоизменяется:

$$\hat{V} = IDCT \left(\Gamma \cdot DCT(W^{bs}(V - \hat{V}) + \hat{V}) \right), \quad (3.13)$$

где матрица W^{bs} содержит биквадратные весовые значения для каждой точки двумерного пространства, которые определяются по методике, описанной в [100]. Итоговое векторное поле определяется итеративным методом за заданное количество итераций. В качестве начального условия используется $V = \hat{V}$. Стоит отметить, что (3.13) реализует в себе как удаление экспериментального шума (сглаживания векторного поля), так и замену выпадающих векторов.

Для восстановления «поврежденного» векторного поля, в некоторых областях которого отсутствуют данные о скорости трассеров (например, при наличии в этой зоне непроницаемой водяной пленки на стекле) выражение (3.13) модифицируется следующим образом:

$$\hat{V} = IDCT \left(\Gamma \cdot DCT(W^m W^{bs}(V - \hat{V}) + \hat{V}) \right), \quad (3.14)$$

где W^m - дополнительная весовая матрица, элементы которой принимают значения 1, если в данной точке присутствует вектор скорости и 0, если он отсутствует.

Выражение (3.14) объединяет в себе функции по полной автоматизации пост обработки мгновенных полей скоростей. В качестве примера на Рисунке 3.4 представлены результаты работы рассмотренного метода применительно к

полидисперсному потоку. Исходное мгновенное векторное поле скоростей, полученное в результате работы PIV алгоритма и некоторой пост обработки средствами программы ActualFlow, изображено на Рисунке 3.4, а. В данном случае рассматривается поток за плоской пластиной. Особенностью движения среды является наличие вихревой дорожки Кармана за выходной кромкой.

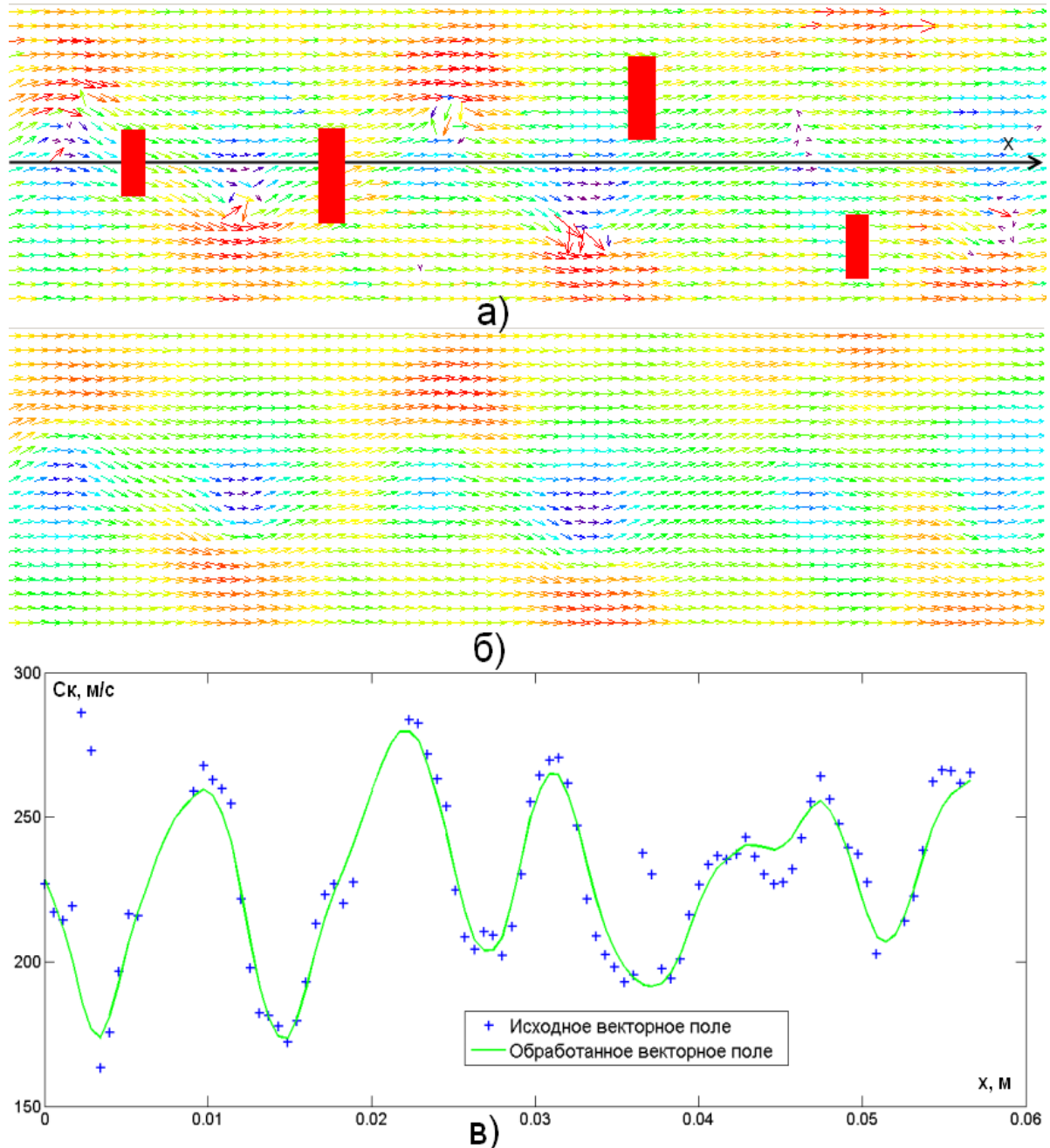


Рисунок 3.4.

Поле скоростей за плоской пластиной. а: исходное векторное поле; б: векторное поле после пост обработки; в: распределение скоростей вдоль линии

В качестве трассеров использовались капли, сконденсировавшиеся в вихрях и при расширении пара в волнах разряжения. Как видно из Рисунка 3.4, а, исходные данные содержат в себе существенное количество «выпадающих» векторов, а также участки, в которых компоненты скорости не были определены (закрашены красными областями). Применение описанного выше метода пост-обработки позволяет избавиться от некорректных (выпадающих) векторов, а также восстановить значение скоростей в «пустых» зонах, основываясь на данных о скоростных характеристиках на соседних участках (см. Рисунок 3.4, б).

В результате проведенной обработки, помимо замены неверных данных и восстановления неопределенных участков, происходит удаление экспериментального шума. На Рисунке 3.4, в представлено распределение скоростей вдоль оси X (см. Рисунок 3.4, а) для обработанных и необработанных данных.

3.4. Расчет траекторий капель по осредненным векторным полям

Расчет линий тока крупных капель производится по алгоритму, описанному в [20]. Метод основывается только на информации, которая явно дана в узлах расчетной сетки PIV метода. Применяется двухмерный метод Фонга [116], базирующийся на билинейной интерполяции вдоль отрезков прямой. Процесс расчета линий тока разделяется на следующие шаги:

1. Инициализация: задается базовая точка (БТ), которая является началом траектории.
2. Локализация базовой точки: определяются узлы ячейки расчетной сетки, в которой БТ расположена.
3. Интерполяция Фонга: определение вектора скорости в БТ, основываясь на данных, записанных в узлах локализованной ячейки (см. Рисунок 3.5). Производится последовательная линейная интерполяция векторов по вертикальным границам ячейки для определения параметров на ее ребрах в точке с вертикальной координатой, равной координате БТ.
4. Интерполяция двух полученных векторов в БТ для определения вектора скорости в данной точке.

5. Задается шаг кусочно-линейного разбиения линии тока. По направлению, определенному вектором в БТ и величине шага, определяется следующая точка линии тока.

6. Пункты 2-5 повторяются применительно к найденной в пункте 5 точке линии тока.

Алгоритм заканчивает работу при достижении рассматриваемой траекторией границ расчетной области. Шаг расчета траекторий капель выбирается равным $\frac{1}{4}$ от размера ячейки на основании погрешности работы PIV метода [57].

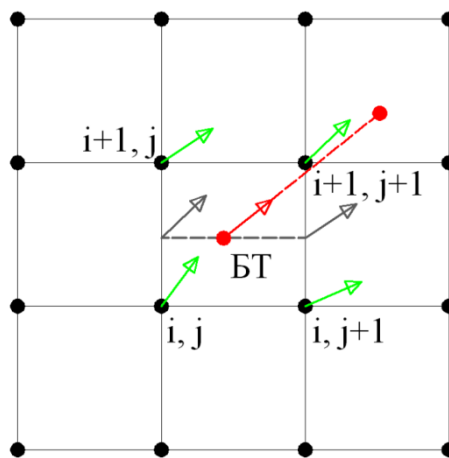


Рисунок 3.5.

Метод расчета траектории капли в регулярной сетке

Особенностью построения траекторий частиц дискретной фазы является то, что через одну точку пространства могут проходить несколько линий (в отличие от линий тока сплошной среды). Это вызвано полидисперсным составом влаги, и каждая отдельная капля движется вдоль своего направления. Прямое применение описанного метода расчета для векторного поля полидисперсных частиц может привести к нефизичности результата. На Рисунке 3.6, в качестве примера, представлена картина траекторий капель за сопловой решеткой на дозвуковом режиме. Наблюдается резкое изменение направления движения частиц жидкости вблизи выходной кромки со стороны спинки профиля. При этом физический

процесс, который мог бы привести к подобному изменению углов капель, отсутствует.

В рассматриваемой области имеет место дополнительный источник потока капель (в данном случае крупных), которые движутся с существенно большими углами. Концентрация этих частиц достаточно высока, чтобы влиять на статистически осредненную картину течения.

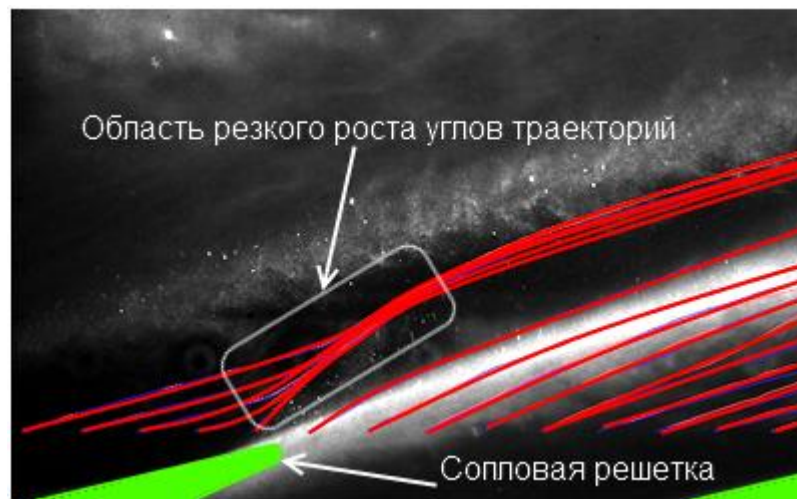


Рисунок 3.6.

Траектории за сопловой решеткой

Для предотвращения подобных результатов при рассмотрении движения частиц вдоль их траекторий производится отсеивание векторов по их коэффициентам скольжения (см. раздел 3.2).

3.5. Модификация математической модели расчета влажнопарового потока в CFD коде Ansys Fluent

Данные о параметрах паровой фазы, необходимые для решения уравнения 3.1, определяются с помощью CFD кода Ansys Fluent. Упрощения, применяемые в математической модели влажного пара, не позволяют производить моделирование процессов, связанных с наличием в потоке крупных капель и пленок жидкости. Однако, как уже отмечалось ранее, влияние крупнодисперсной влаги на потери кинетической энергии паровой среды минимально [115]. Для

обеспечения точности при применении рассматриваемой расчетно-экспериментальной методики, результаты моделирования должны быть максимально приближены к реальным. В первую очередь это касается определения величины и направления скорости паровой фазы, а также таких параметров основного потока, как вязкость и плотность. Кроме того, применяемые расчетные методы должны обеспечивать достаточно быструю сходимость и устойчивость процесса расчета. Исходя из этого, некоторые расчетные модули CFD кода были модифицированы, основываясь на современных подходах численной гидрогазодинамики. Благодаря гибкой системе, обеспечивающей подключение программных кодов пользователя на языке C (UDF), Ansys Fluent позволяет существенно изменить используемые расчетные модели. В настоящей работе для повышения точности расчета параметров паровой фазы модификации подверглись используемая модель турбулентности и свойства водяного пара.

3.5.1. Модель турбулентности

В качестве модели, описывающей дополнительные Рейнольдсовы напряжения, которые возникают при выведении осредненных уравнений Навье-Стокса, была выбрана стандартная k - ε модель турбулентности [110]. Для замыкания системы (2.11) вводятся дополнительные полуэмпирические уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и турбулентной диссипации:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (3.16)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ε – турбулентная диссипация; μ_t – турбулентная вязкость; G_k – член, характеризующий генерацию энергии турбулентности вследствие наличия градиента средней скорости; Y_M – член, характеризующий влияние сжимаемости среды на диссипацию энергии турбулентности; S_k , S_ε – дополнительные члены, которые может вести

пользователь; величины $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε - константы модели. Данные уравнения используются для моделирования процессов в области ядра потока, в то время как зона вблизи твердой стенки рассчитывается с помощью пристеночной функции, которая определяет распределение параметров потока в пограничном слое вблизи твердых стенок. Модификации рассматриваемой модели турбулентности проводились только для уравнений, описывающих ядро потока. Величина турбулентной вязкости, возникающая в связи с влиянием пульсационных составляющих скорости на средние значения (в осредненном движении как бы увеличивается сопротивление возникновению деформации [87]), для данной модели определяется следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3.17)$$

где C_μ - константа модели. На основе уравнений (3.15), (3.16) и выражения (3.17) определяются значения Рейнольдсовых напряжений по гипотезе Буссинеска:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.18)$$

Рассматриваемая модель турбулентности имеет существенный ряд достоинств. Ими являются [128]: достаточная простота, высокая скорость схождения, приемлемый результат численного моделирования, а также невысокие требования к качеству сетки. Однако, несмотря на широкий круг задач, к которым данную модель можно применить, хорошо известны ее недостатки. Расчет со стандартной k - ε моделью турбулентности может привести к значительным ошибкам при моделировании неравновесных течений с большим градиентом скорости и сильно искривленных потоков. Таким образом, эта модель может быть применима только к практически равновесным потокам, для которых приближенно выполняется равенство диссипации и генерации энергии турбулентности ($G_k \approx \varepsilon$) [92]. В результате применения стандартной модели турбулентности k - ε имеет место завышенное значение степени турбулентности. Для равновесных течений подобный расчетный результат не приводит к существенным погрешностям в моделировании основных параметров ядра

потока, так как рост значения турбулентной вязкости μ_t в этой области слабо влияет на характер распределения газодинамических величин. При течении пара турбулизация потока играет существенную роль в процессах конденсации. В турбулентных потоках, которые относятся к статистическим системам, всегда существует отличная от нуля вероятность образования метастабильных состояний в отдельных их частях и, соответственно, процесса конденсации [30]. В первую очередь это касается релаксационных процессов на сверхзвуковых режимах течения, проявляющихся в виде скачков конденсации, а также конденсации пара в вихревых закруточных следах. При использовании стандартной k - ε модели турбулентности эти явления из-за повышенной величины степени турбулентности «размазываются» и таким образом, четко не проявляются. Это может привести к существенной погрешности определения энергетических и скоростных характеристик паровой среды (конденсация пара сопровождается выделением теплоты в окружающую среду).

Для повышения точности расчетной модели турбулентности, она была модифицирована в соответствии с [3]. Основная идея работы заключается в связывании между собой генерации и диссипации турбулентности. Это достигнуто путем разложения системы неявных алгебраических уравнений для рейнольдсовых напряжений относительно градиента средней скорости [128, 101]. Первый член разложения дает соотношение для определения турбулентной вязкости:

$$\mu_t = \frac{C_\mu}{1 + \left(\frac{G_k}{\varepsilon\rho} - 1\right)/C_1} \frac{k^2}{\varepsilon} \rho. \quad (3.19)$$

В соответствии с представленной формулой, коэффициент турбулентной вязкости зависит от отношения генерации к диссипации турбулентности. Кроме того, вводится дополнительная постоянная модели C_1 . Как показано в [123] константа C_1 играет существенную роль в устойчивости турбулентного течения. Оптимального значения для величины C_1 не найдено. В работе [90] показано, что величина этой константы должна соответствовать неравенству:

$$0 \leq C_1 - 1 \leq 1. \quad (3.20)$$

В работе [3] было выбрано значение $C_1 = 1,1$. Такая же величина константы используется в настоящей работе. Применение модифицированной модели турбулентности позволило выявить физические процессы, которые не проявляются при работе стандартной k - ϵ модели. На Рисунке 3.8 представлены полученные в [3] результаты моделирования движения насыщенного пара в сопле Лаваля на расчетном режиме с использованием различных расчетных моделей. Как видно, расчет с модифицированной моделью турбулентности хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. Рисунок 3.7, а) – проявляется скачок конденсации, вызванный релаксационным процессом спонтанной конденсации в сверхзвуковом потоке. Стандартная k - ϵ модель данный процесс не выявила, так как повышенные значения степени турбулентности (см. Рисунок 3.7, б) приводят к тому, что конденсация пара «размазывается» вдоль сопла. Детальная верификация модифицированной модели турбулентности будет проведена ниже.

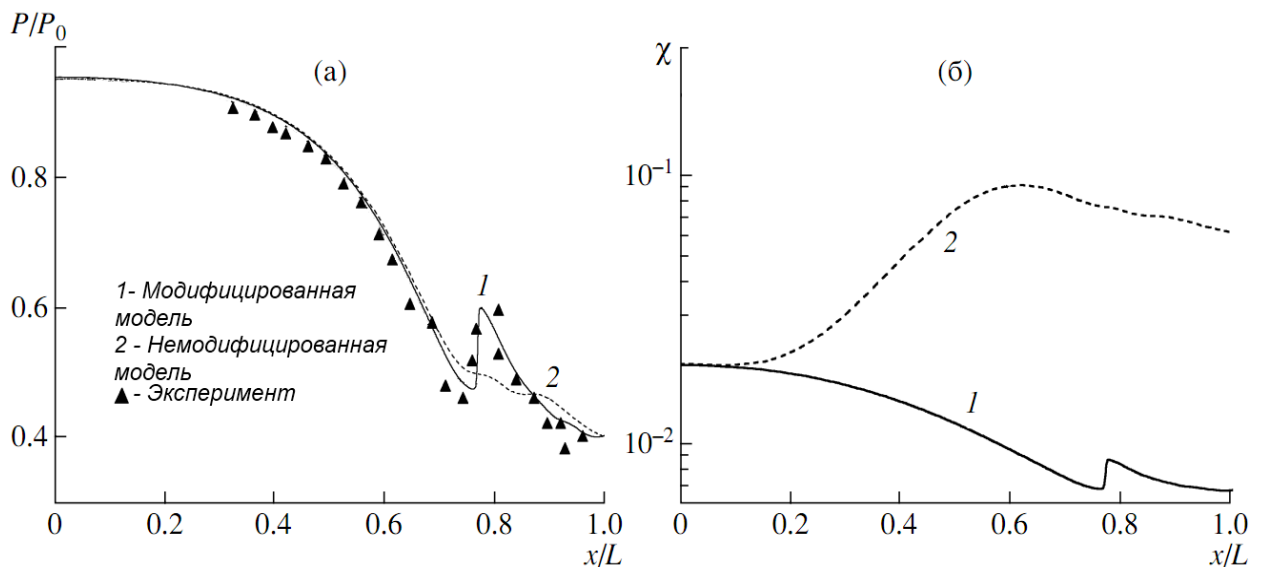


Рисунок 3.7.

Сравнение модифицированной и немодифицированной стандартных k - ϵ моделей турбулентности на примере сопла Лаваля. а: распределение отношения статического давления к давлению полного торможения вдоль сопла; б: распределение степени турбулентности вдоль сопла

3.5.2. Свойства воды и водяного пара

Математическое описание свойств влажного пара, интегрированное в CFD код Ansys Fluent, реализовано на основе уравнений, представленных в [137]. Используемые уравнения состояния, как подчеркивается в [91], имеют упрощенный вид и их использование обусловлено повышением скорости моделирования задач газодинамики.

Пневмометрические измерения статического давления, давления полного торможения, температуры полного торможения позволяют определить набор основных параметров двухфазного потока (потери кинетической энергии, коэффициенты расхода, углы выхода и пр.), кроме того эти величины определяют режим течения среды. Потребность в наложении полей скоростей жидкой и паровой фаз друг на друга при работе рассматриваемой методики накладывает жесткие требования в определении свойств среды, так как необходимо корректно устанавливать режимные параметры течения для расчетной модели, чтобы обеспечить сопоставление экспериментальных и расчетных данных. Кроме того это позволяет производить подробную верификацию численных методов. Используемая по умолчанию математическая модель описания свойств среды не обеспечивает достаточную точность в определении некоторых основных газодинамических параметров, которые можно сравнивать с экспериментальными данными. Для проведения расчета течения влажного пара Ansys Fluent определяет следующие параметры среды:

- Давление (p), изобарная (c_{pn}) и изохорная (c_{vn}) теплоемкости, энтальпия (h), энтропия (s), динамическая вязкость (μ_n), коэффициент теплопроводности (k_n) паровой фазы (как функция плотности паровой фазы и температуры).
- Плотность паровой фазы (ρ_n) (как функция давления и температуры).
- Давление насыщения (p_s) (как функция температуры).
- Температура насыщения (T_s) (как функция давления).

- Плотность (ρ_6), динамическая вязкость (μ_6), изобарная (c_{p6}) теплоемкость, коэффициент теплопроводности (k_6), коэффициент поверхностного натяжения (σ_6) жидкой фазы.

На Рисунке 3.8 в качестве примера представлена абсолютная погрешность в определении давления в зависимости от температуры и плотности паровой фазы. На Рисунке:

$$\Delta p = |p_{fluent} - p_{IAPWS}|, \quad (3.21)$$

где p_{fluent} – давление, определенное по формулам Fluent [137], как функция температуры и плотности; p_{IAPWS} – давление, определенное по уравнениям, предложенным Международной Ассоциацией по Свойствам Воды и Водяного Пара [121], которое можно считать эталонным. На Рисунке также отмечена разница в миллиметрах водяного столба на линии насыщения.

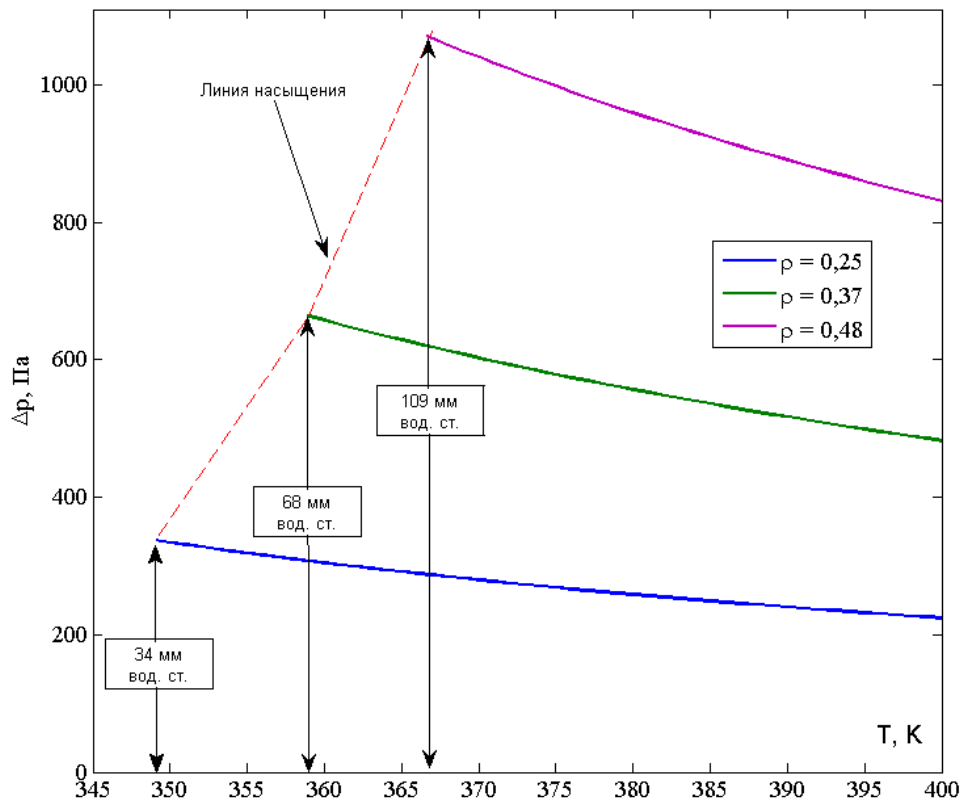


Рисунок 3.8.

Распределение абсолютной погрешности в определении давления в зависимости от температуры при различных значениях плотности паровой фазы

Как видно из Рисунка 3.8, повышение плотности пара ведет к существенному росту погрешности определения его свойств. При переходе за линию насыщения (метастабильное состояние – переохлажденный пар) тенденция кривых сохраняется. Это может привести к некорректному определению зон конденсации пара, и погрешности в расчете массовой составляющей влаги. Кроме того, погрешность, появляющаяся в результате применения стандартной модели влажного пара, может привести к физически некорректным результатам. На Рисунке 3.9, а представлено распределение давления полного торможения основного потока в изолированной турбинной решетке. По мере движения потока вдоль канала давление полного торможения растет, что невозможно при отсутствии внешних источников подвода энергии. Подобный результат численного моделирования создает трудности в сопоставлении экспериментальных и расчетных данных между собой.

Таким образом, для обеспечения точности определения параметров двухфазной среды при моделировании течения в CFD коде Ansys Fluent была изменена математическая модель описания свойств воды и водяного пара, основываясь на последних рекомендациях Международной Ассоциацией по Свойствам Воды и Водяного Пары [105, 119 – 122]. На Рисунке 3.9, б в качестве примера представлено распределение давления полного торможения, полученное в результате расчета с помощью модифицированной модели.

На Рисунках 3.10-3.13 представлены сравнения распределений некоторых параметров потока вдоль шага решетки (линия изображена на Рисунке 3.9) для стандартной и модифицированной модели влажного пара. Здесь и далее относительная координата:

$$\bar{x} = \frac{x}{t}, \quad (3.22)$$

где x – координата вдоль шага решетки, t – величина шага решетки. Температура переохлаждения пара:

$$\Delta T_s = T_s - T, \quad (3.23)$$

где T_s – диаграммная температура насыщения, соответствующая статическому давлению в рассматриваемой точке. Как видно из представленных Рисунков, помимо давления полного торможения, существенные изменения касаются численного моделирования термодинамических параметров (влажность и температура переохлаждения). При этом, если сами значения этих параметров (кроме распределения p_0) практически не отличаются друг от друга (хотя в некоторых точках вдоль оси разница составляет до 25% для температуры переохлаждения и 12% для влажности), то характер распределений изменяется существенно. Положение максимума влажности (см. Рисунок 3.11) и минимума температуры переохлаждения (см. Рисунок 3.12) при переходе от немодифицированной модели к модифицированной смещается на 11% от шага решетки. Поле скоростей паровой фазы, являющееся наиболее важным для разрабатываемой методики, практически не изменяется (см. Рисунок 3.13).

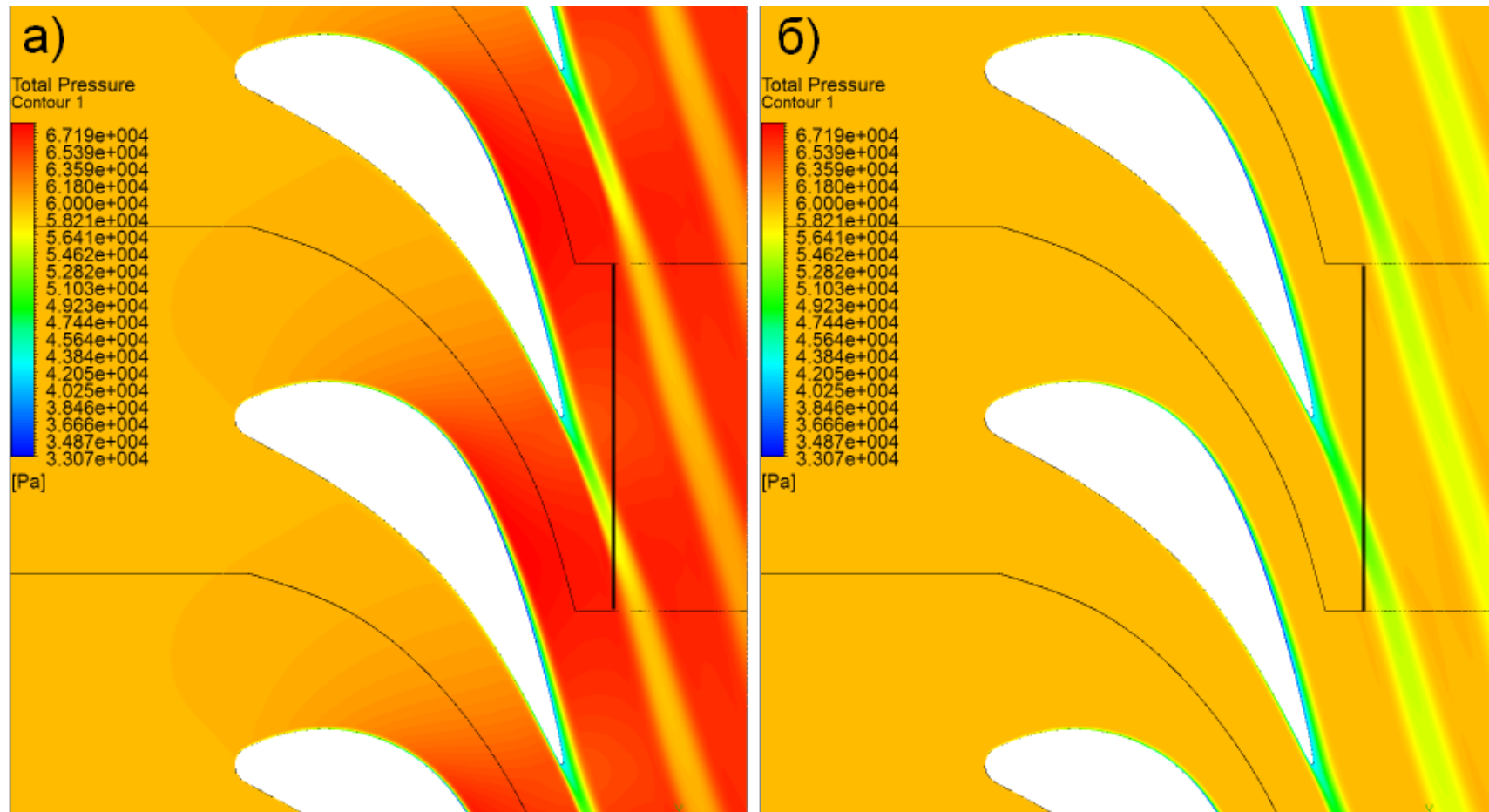


Рисунок 3.9.

Распределение давления полного торможения в изолированном межлопаточном канале сопловой решетки. а: используемые по умолчанию свойства воды и водяного пара; б: модифицированные свойства воды и водяного пара

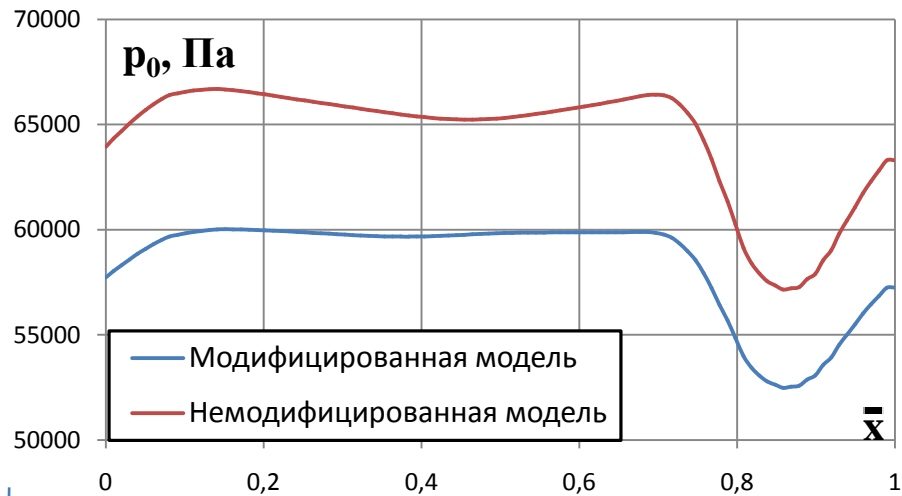


Рисунок 3.10. Распределение давления полного торможения пара за решеткой

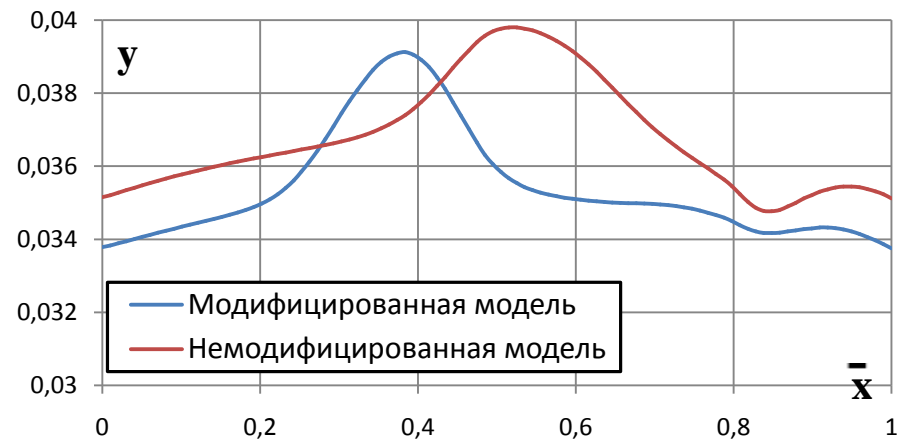


Рисунок 3.11. Распределение влажности пара за решеткой

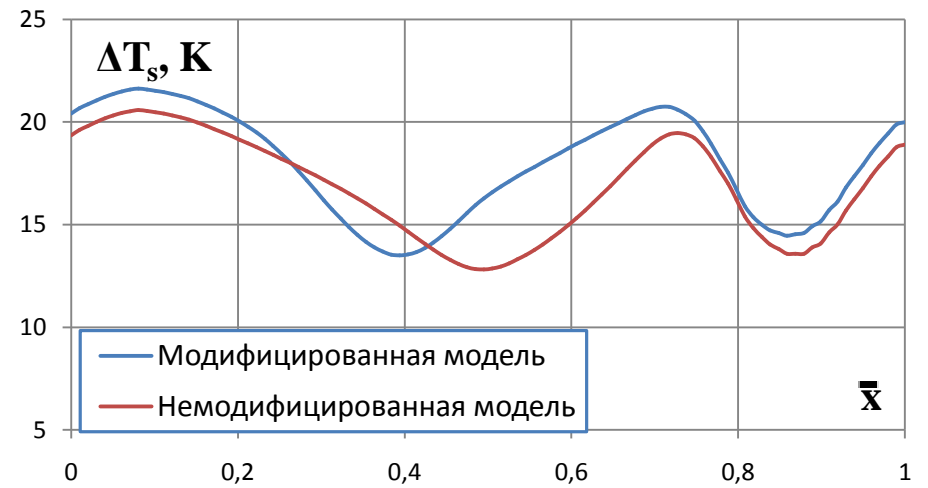


Рисунок 3.12. Распределение температуры переохлаждения пара

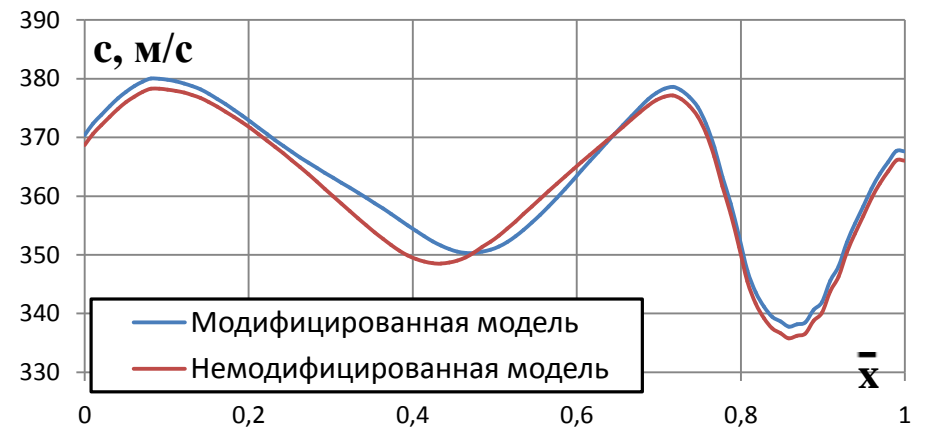


Рисунок 3.13. Распределение скорости пара за решеткой

Таким образом, модифицированная модель описания свойств воды и водяного пара необходима в первую очередь для корректного сопоставления расчетных и экспериментальных данных: задание граничных условий, определение интегральных термодинамических параметров и энергетических характеристик потока. При этом существенного перестроения скоростных характеристик паровой фазы не происходит.

3.6. Верификация CFD кода Ansys Fluent

Для обоснованного применения CFD кода Ansys Fluent в разрабатываемой методике определения размеров капель, необходима верификация результатов численного моделирования для подтверждения корректности получаемых данных. Проведенные ранее работы по данной проблеме [93, 133] показали достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных результатов. Однако не анализировалось влияние наличия крупной влаги на характеристики потока. Кроме того, введенные в расчетные модели модификации требуют проверки на свою корректность.

Течение влажнопарового потока в межлопаточном канале сопровождается комплексом сложных процессов. При этом каждое из явлений в большей или меньшей степени влияет на характеристики паровой фазы. В данной работе автор выделил 2 основных направления для верификации расчетного пакета:

1. Неравновесное состояние среды с последующей релаксацией. Необходимо убедиться, что представленная выше (см. пункт 3.5.1) модифицированная модель турбулентности позволяет рассчитывать течения со спонтанной конденсацией пара – скачками конденсации.

2. Наличие крупной влаги в сопловой решетке может существенно изменять газодинамические характеристики потока. Это в первую очередь связано с формированием водяной пленки на поверхности лопатки. Так как Ansys Fluent с применяемыми настройками не может рассчитывать пленки на стенках канала, важно экспериментально определить степень влияния этих процессов на энергетические характеристики потока и сравнить их с расчетными данными.

Таким образом, важно определить границы применимости расчетной модели, реализованной в CFD коде Ansys Fluent, для расчета влажнопаровых потоков.

3.6.1. Течение перегретого пара в сопле Лавалья

При моделировании течения влажного пара необходимо добиться, чтобы в результате расчета отслеживалось большинство процессов, связанных с наличием жидкой фазы в потоке. В частности, важно корректное определение зон спонтанной конденсации пара при сверхзвуковом течении. Для этих целей, как отмечалось выше, была модифицирована k - ε модель турбулентности.

Для проверки достоверности получаемых в результате моделирования данных, было проведено исследование течения перегретого пара (температура которого выше температуры насыщения на входе в канал) в плоском несимметричном сопле Лавалья. На Рисунке 2.18 представлена геометрия канала, а на Рисунке 2.19 – схема эксперимента. Для визуализации волновой структуры парового потока используется автоколлимационный теневой прибор ИАБ-451. Также с помощью пароконмутатора определялось распределение статического давления на профилированной вставке сопла (см. Рисунок 2.19). При этом рассматривались как расчетные, так и нерасчетные (с присутствием в канале скачка уплотнения) режимы течения в сопле Лавалья.

Верификация данных численного моделирования производилась на основе сравнения рассчитанной структуры потока, с теневыми фотографиями течения, сделанными в оптическом поле ИАБ-451. Кроме того производится сравнение распределений статического давления вдоль профилированной вставки канала.

На Рисунке 3.14 представлены теневые фотографии волновой структуры потока при различных режимах течения и соответствующие им расчетные данные. Представленные данные соответствуют начальному перегреву пара $\Delta T_0 = 5$ К. Здесь и далее:

$$\Delta T_0 = T_0 - T_s, \quad (3.24)$$

где T_0 – температура полного торможения пара перед исследуемым каналом; T_s – температура насыщения при заданном давлении полного торможения перед

соплом. Однофазный паровой поток после пересечения минимального сечения сопла имеет сверхзвуковую скорость и продолжает ускоряться в расширяющейся части канала. Параметры пара переходят в зону метастабильного состояния переохлаждения [60] – температура потока оказывается ниже температуры насыщения при данном давлении. При достижении температуры переохлаждения критического значения ($\Delta T_s \approx 30$ К) происходит релаксационный процесс (скачок конденсации) – переход от неравновесного состояния в равновесное. Данное явление заключается в спонтанной конденсации пара, сопровождающейся выделением теплоты, что способствует скачкообразному торможению сверхзвукового потока, при этом в данном случае течение остается сверхзвуковым. На теневых фотографиях отчетливо видны как скачок конденсации вблизи минимального сечения сопла, так и волна сжатия, исходящая от профилированной стенки в том месте, где к ней приближается скачок конденсации. Наличие этой волны связано с перерасширением потока в канале, и ее местоположение зависит в основном от параметров течения и геометрии канала [60]. В данном случае не реализовались режимы с мигрирующими скачками конденсации, что объясняется большой скоростью расширения потока в сверхзвуковой части сопла. Помимо скачка конденсации, ниже по течению присутствует скачок уплотнения, который переводит поток в дозвуковое состояние.

Как видно из представленных данных, результаты численного моделирования довольно точно отображают наблюдаемую структуру потока. Необходимо отметить, что численное моделирование было проведено в стационарной постановке. Также проводился расчет с исходной стандартной моделью турбулентности, в результате которого скачок конденсации выявлен не был, а непосредственно сам расчет не сошелся.

На Рисунке 3.15 представлено распределение относительного статического давления вдоль профилированной вставки канала. Здесь:

$$\bar{L} = \frac{x}{L}, \quad (3.25)$$

где x – координата вдоль сопла, исходящая из геометрического минимального сечения; L – длина расширяющейся части канала.

$$\varepsilon = \frac{p}{p_0}. \quad (3.26)$$

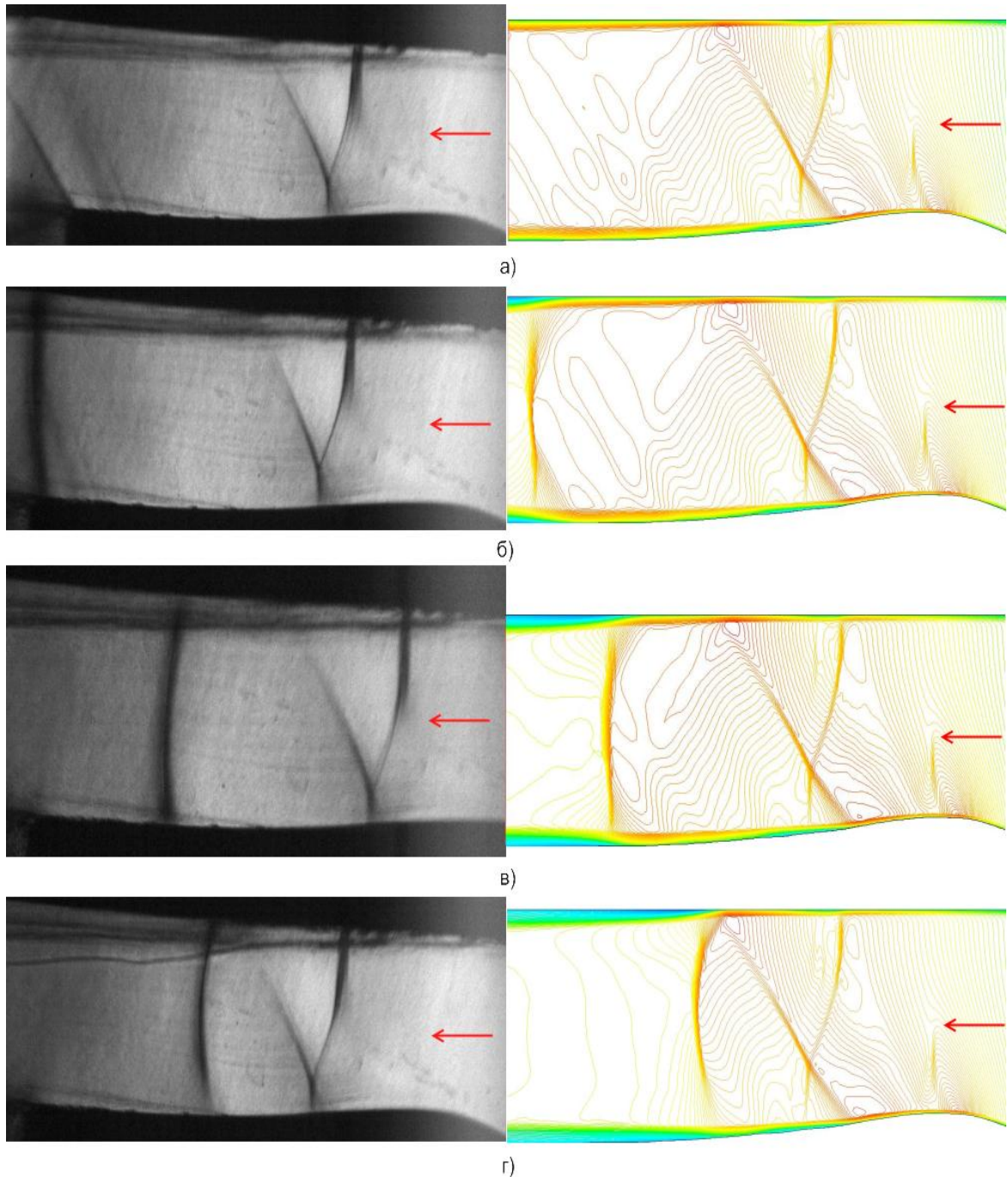


Рисунок 3.14.

Теневые фотографии (слева) и соответствующие им расчетные картины течения (справа) на различных режимах при начальном перегреве выше температуры насыщения $\Delta T_0 = 5\text{K}$. а: $\varepsilon_a = 0,38$; б: $\varepsilon_a = 0,51$; в: $\varepsilon_a = 0,63$; г: $\varepsilon_a = 0,66$

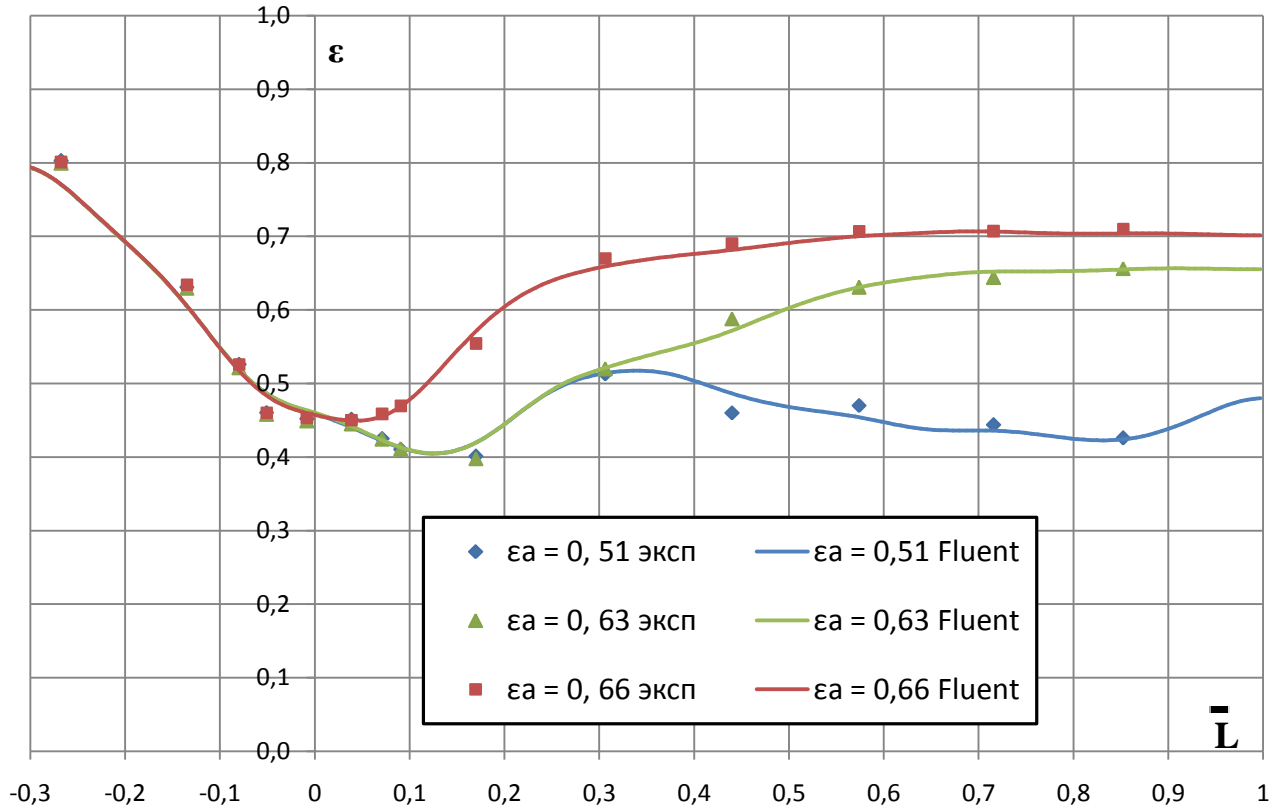


Рисунок 3.15.

Распределение статического давления вдоль профилированной стенки сопла при различных режимах течения при начальном перегреве пара выше температуры насыщения $\Delta T_0 = 5$ К.

Наблюдается хорошее согласование в результатах численного расчета и пневмометрических измерений. Скачок конденсации на распределениях проявляется довольно сглаженным (как и скачок уплотнения) из-за «размывания» параметров в дозвуковой области пограничного слоя.

В качестве сравнения характера течения потока в сопле Лавалья со скачком конденсации и без него, на Рисунке 3.16 представлено распределение статического давления при высоком начальном перегреве пара $\Delta T_0 = 67$ К, когда спонтанная конденсация не наблюдается.

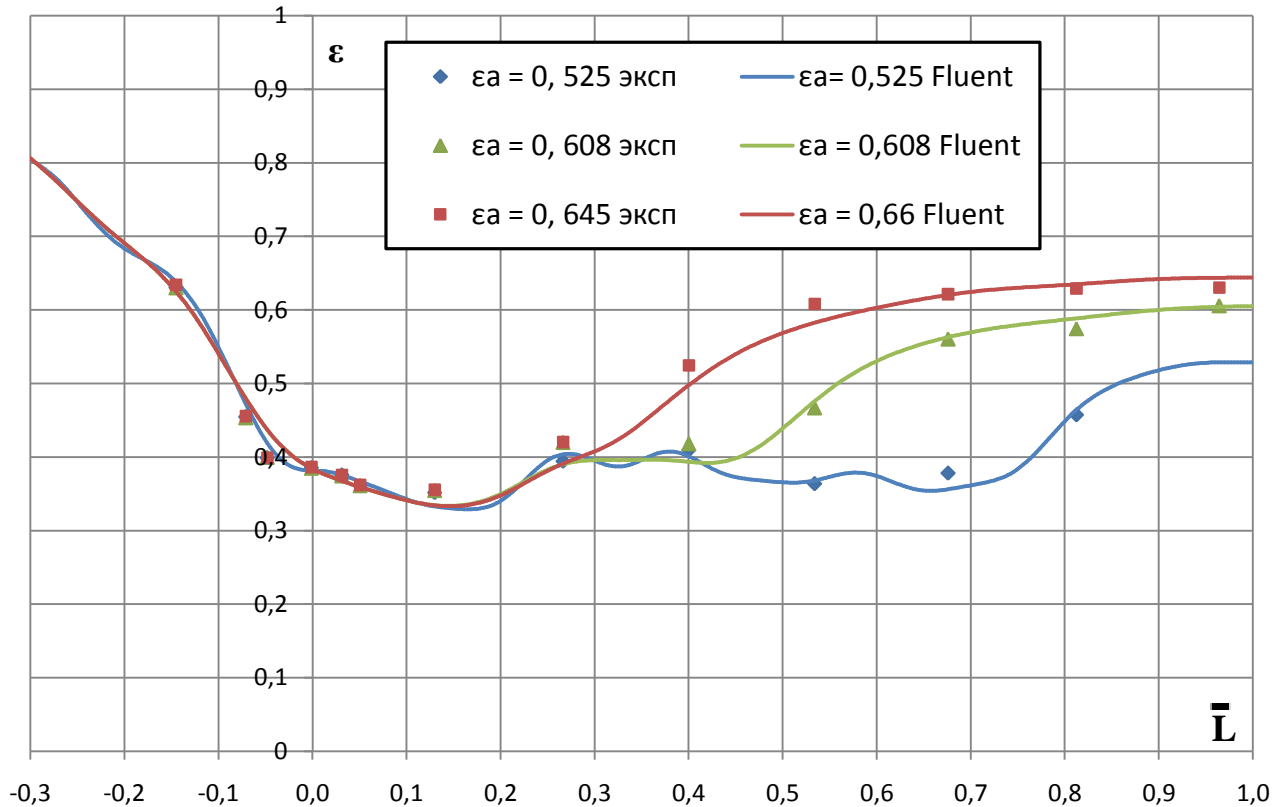


Рисунок 3.16.

Распределение статического давления вдоль профилированной стенки сопла при различных режимах течения при начальном перегреве пара выше температуры насыщения $\Delta T_0 = 67$ К.

3.6.2. Течение влажно парового потока в изолированной сопловой решетке

Влияние режимных параметров (начальной влажности пара и теоретического числа Маха за решеткой) на энергетические характеристики изолированных сопловых решеток исследованы довольно подробно [34, 22, 21]. Можно выделить основные источники роста степени диссипации энергии потока, связанные с наличием в потоке дискретной фазы [44]:

- Потери энергии на процессы конденсации (теплообмен при фазовом переходе, неравновесное состояние системы).
- Образование водяных пленок на поверхностях лопаток, что приводит к изменению режима течения в пограничных слоях.

- Механическое взаимодействие фаз, связанное с разгоном капель основным потоком.
- Изменение геометрических характеристик профиля вблизи выходной кромки, вследствие их утолщения из-за наличия водяной пленки

Таким образом, можно разделить процессы взаимодействия фаз на три группы: термодинамические, механические и газодинамические. Имеющиеся на данный момент вычислительные способности не позволяют создать расчетную модель, в полной мере описывающую все вышеперечисленные процессы. Как отмечалось в Главе 2, упрощения, примененные в CFD-коде Fluent, позволяют в полной мере анализировать только термодинамическое взаимодействие фаз и игнорируют механическое и газодинамическое. В работах, посвященные численному моделированию течения пара в последних ступенях паровых турбин [130], наблюдается достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений интегральных энергетических характеристик потока. Однако нужно иметь в виду, что рассматривается течение мелкодисперсной влаги, сформировавшейся вследствие естественной конденсации в проточной части турбины. Используемый в настоящей работе экспериментальный стенд формирует в первую очередь крупные капли, поэтому в данном случае возможно существенное механическое взаимодействие между фазами, которое может влиять на параметры паровой среды. Таким образом, необходимо проверить корректность применения расчетной модели влажного пара для разрабатываемой методики в обеспечиваемых экспериментальным стендом условиях.

Для верификации математической модели влажного пара, производилось экспериментальное исследование течения влажного пара за плоской изолированной сопловой решеткой. Объект исследования представлен на Рисунке 2.26, его геометрические характеристики отображены в таблице 2.2, а схема эксперимента - на Рисунке 2.27. В рамках исследования производилось сравнение интегральных коэффициентов потерь кинетической энергии, полученных

экспериментально и численным методом. На расстоянии $0,1b$ от выходной кромки вдоль шага решетки посередине высоты лопатки производилось траверсирование потока пара зондом полного торможения, а также измерялось статическое давление. Рассматривалось течение влажнопарового потока при различных начальных значениях влажности и теоретического числа Маха за решеткой. Величина потерь кинетической энергии в точке определялась по формуле [23]:

$$\zeta = \frac{2}{k-1} \frac{1}{M_{1t}^2} \left(\varepsilon_0^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (3.27)$$

где k – показатель изоэнтропы (для влажного пара $k = 1,13$); M_{1t} – теоретическое число Маха за решеткой, которое определяется по формуле:

$$M_{1t} = \left[\left(\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{2}{k-1} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.28)$$

где p_0 – давление полного торможения перед решеткой; p – статическое давление за решеткой. В формуле (3.27) величина ε_0 определяется следующим образом:

$$\varepsilon_0 = \frac{p_{01}}{p_0}, \quad (3.29)$$

где p_{01} – давление полного торможения в точке за решеткой. Для определения интегрального значения потерь кинетической энергии использовалось простое выражение:

$$\zeta_{\Sigma} = \frac{1}{t} \int_0^t \zeta dx, \quad (3.30)$$

где t – шаг решетки; x – координата вдоль шага решетки.

Моделирование течения в межлопаточном канале производилось на сетке, представленной на Рисунке 2.31.

Результаты проведенного исследования представлены на Рисунке 3.17, на котором отображены значения интегральных потерь кинетической энергии при различных значениях начальной влажности пара и теоретического числа Маха за решеткой.

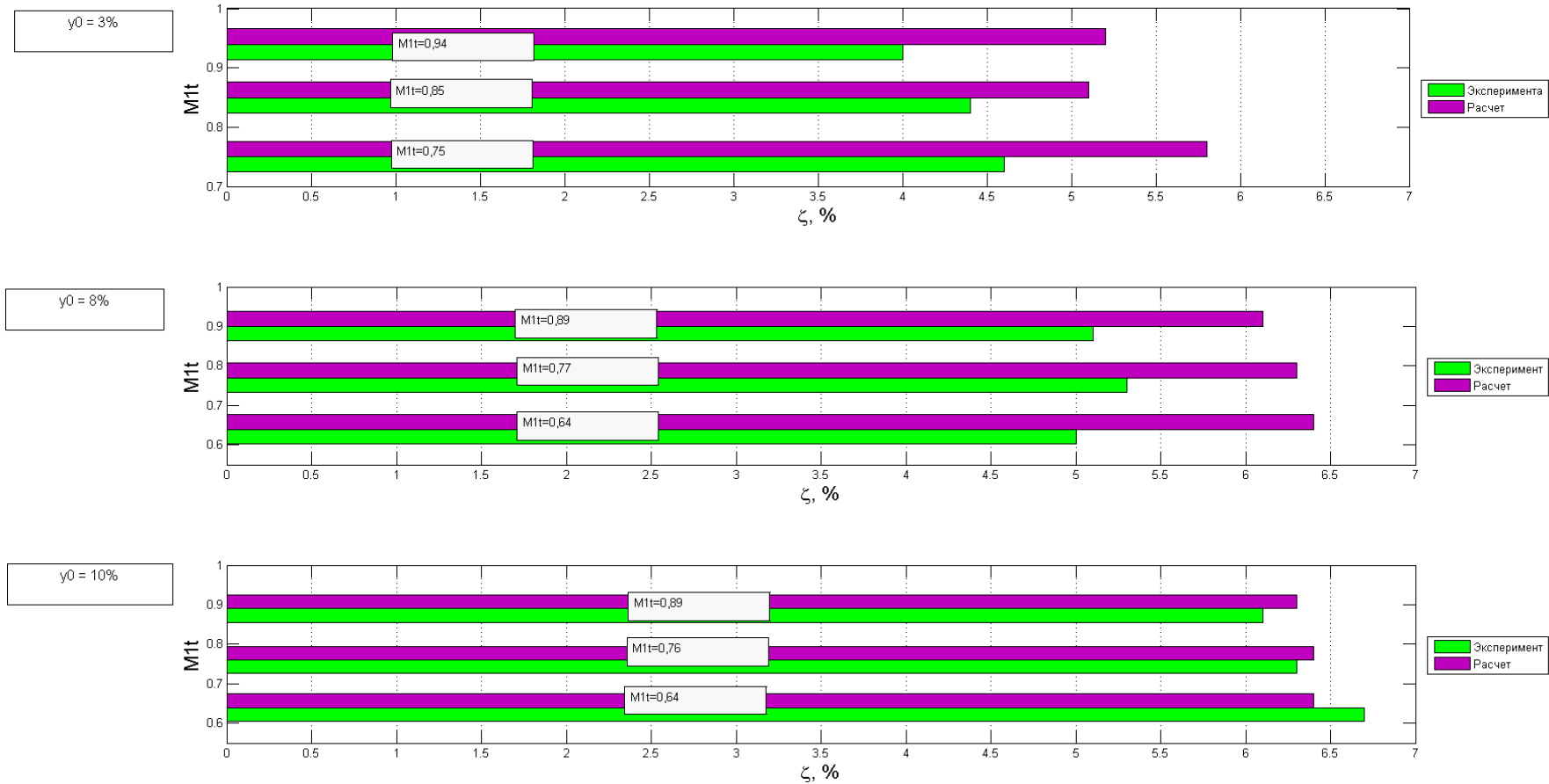


Рисунок 3.17.

Профильные потери кинетической энергии при различной начальной влажности и теоретическом числе Маха за решеткой

С ростом начальной влажности пара происходит увеличение потерь кинетической энергии. Применение CFD кода с модифицированной моделью турбулентности дает завышенное значение потерь кинетических энергии практически для всех значений начальной влажности. При малых y_0 максимальное абсолютное значение рассогласования в расчетных и экспериментальных данных составляет порядка 1,5 %. С ростом начальной влажности отличия в результатах моделирования и пневмометрических измерений снижается и при $y_0 = 10\%$ они практически отсутствуют. Стоит отметить, что серьезное изменение потерь кинетической энергии при варьировании начальной влажности пара происходит в области кромочного следа. На Рисунке 3.18 представлены экспериментальные распределения потерь кинетической энергии при различных значениях y_0 . Полученные данные хорошо согласуются с результатами [36, 42].

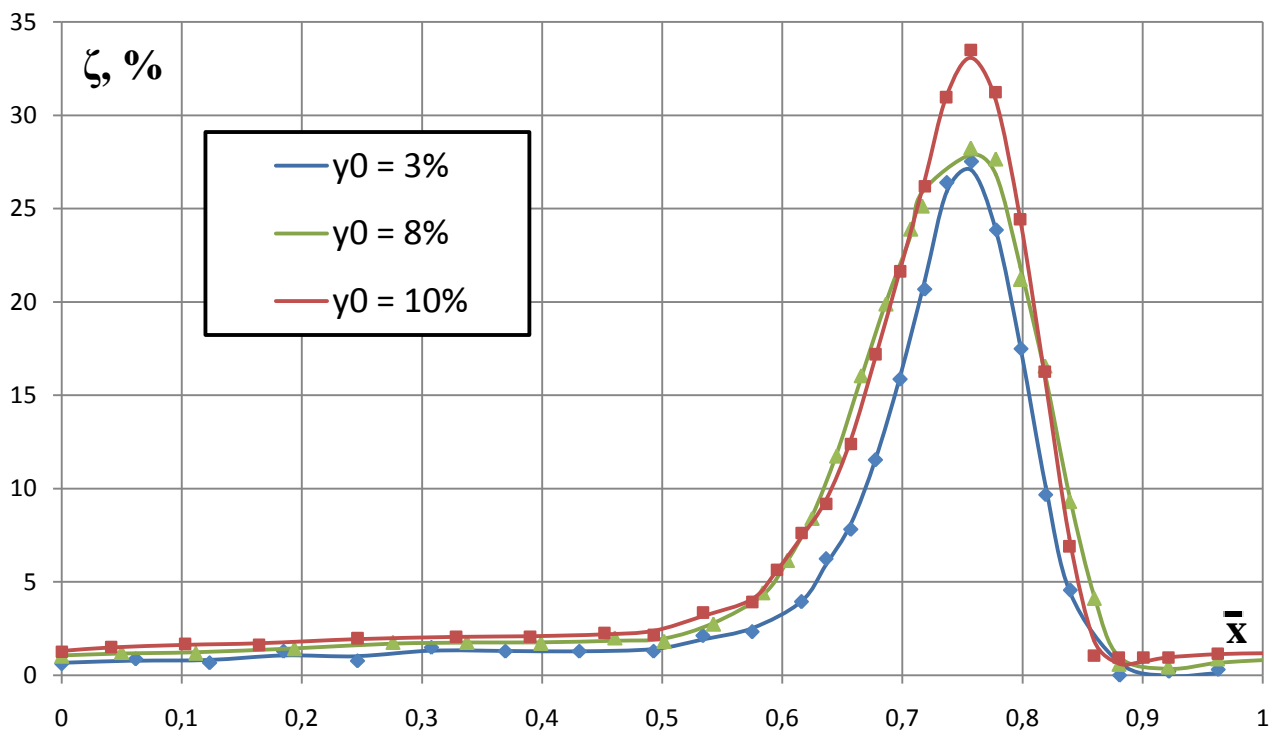


Рисунок 3.18.

Распределение коэффициентов потерь кинетической энергии вдоль шага за решеткой при различных значениях начальной влажности пара и теоретическом числе маха $M_{1t} = 0,75$

Потери в ядре потока при изменении начальной влажности пара от 3% до 10% возрастают в 2 раза от 1% до 2%, что обусловлено термодинамическими процессами фазовых переходов. В тоже время величина ζ в кромочном следе в абсолютном значении изменяется существенно – их максимум растет на 6%. Это обусловлено изменением характера течения основной фазы вблизи стенок лопаток решетки и в области выходной кромки, вызванные в первую очередь процессами, которые интенсифицируются при наличии крупных капель в потоке.

На вогнутой поверхности профиля при отсутствии влаги практически по всей ее длине сохраняется ламинарное течение при условии малой степени турбулентности потока перед решеткой (что справедливо для используемого в работе пародинамического стенда КВП-2). Однако появление на стенках канала водяной пленки, связанное в первую очередь с оседанием на нее крупных капель, приводит к существенным изменениям параметров в пограничном слое. Помимо повышения вязкости и образования пограничного подслоя жидкой фазы, существенное влияние также имеет режим течения пленки [30]. Формирование волн на поверхности раздела парового и водяного пограничных слоев вследствие спутного движения фаз приводит к появлению вихрей. Это связано с образованием чередующихся конфузорных и диффузорных участков течения на волновой поверхности. Схема их появления представлена на Рисунке 3.19. Таким образом, можно утверждать, что механизм взаимодействия фаз на волновой границе раздела турбулизирует пристеночный паровой поток. Помимо этого, при достижении в водяной пленке некоторого расхода, на ней начинают формироваться шквалистые волны [64], с которых срываются дискретные частицы жидкой фазы, что также является источником турбулентности.

Можно сделать вывод, что увеличение расхода в пленке вследствие роста начальной влажности, является причиной того, что пограничный слой на вогнутой поверхности лопатки переходит в турбулентный режим гораздо раньше, чем при отсутствии капель в потоке. Это может быть одной из причин роста потерь кинетической энергии при увеличении начальной влажности.

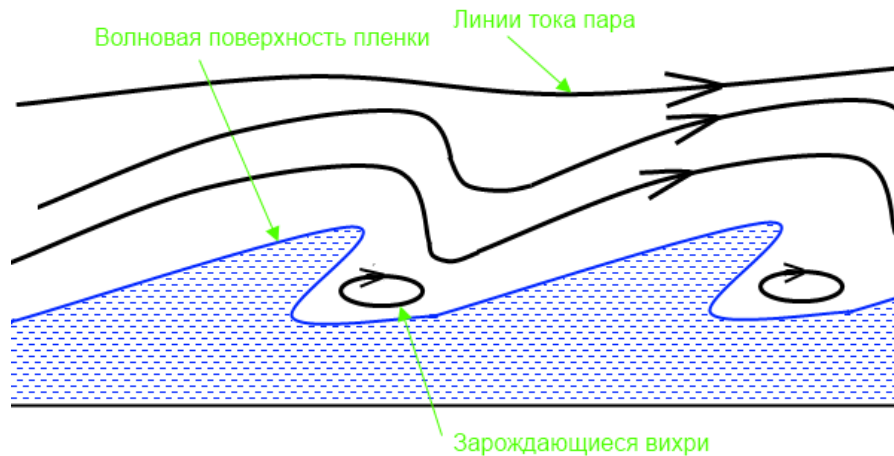


Рисунок 3.19.

Схема зарождения вихрей вблизи волновой поверхности раздела фаз

На энергетические характеристики паровой фазы в кромочном следе также имеют влияние «утолщение» выходной кромки, вызванное опять же наличием водяной пленки на поверхности лопатки, а также процесс ее срыва и дробления в потоке.

Применяемая математическая модель учета вязкостных эффектов рассчитывает только турбулентные режимы течения в пограничном слое вблизи стенок канала. Поэтому она дает завышенные значения потерь кинетической энергии при малых значениях начальной влажности. По мере повышения y_0 интенсифицируются описанные выше процессы, приводящие к росту диссипации энергии. Это способствует хорошему совпадению экспериментальных и расчетных данных при больших значениях начальной влажности пара.

Таким образом, в целях получения корректных данных только о паровой фазе, отсутствие учета в CFD коде крупных капель можно компенсировать корректным выбором модели турбулентности. Однако для этого необходимо знание о наличии на поверхности лопаток развитой водяной пленки. Имея эти данные можно для малых значений начальной влажности (в данном случае для $y_0 = 3\%$) использовать переходные модели учета эффекта вязкости, такие как Transition SST или k-kl- ω (они учитывают турбулентное, ламинарное и

переходное течение). С ростом y_0 необходимо переходить на модели, учитывающие только турбулентное течение.

В настоящей работе для всех режимов используется модифицированная в разделе 3.5.1 k - ϵ модель турбулентности, так как погрешность, вносимая ею при малых значениях начальной влажности, автор считает приемлемой при оценке средних размеров капель.

3.7. Апробация методики бесконтактного определения средних размеров капель

Разработанная в данной Главе расчетно-экспериментальная методика бесконтактного измерения размеров капель с помощью системы лазерной диагностики и интегрированного в нее корреляционного метода определения полей скоростей PIV верифицировалась в суживающемся сопле. На данный момент применение корреляционного PIV алгоритма позволяет определять средние по концентрации размеры капель, поэтому ниже будут рассматриваться именно эти характеристики дисперсной фазы. Кроме того, необходимо отметить, что измеряются диаметры только крупных капель. Объект исследования, изображен на Рисунке 2.21. Схема измерения представлена на Рисунке 2.22. Сравнение проводилось с данными, полученными с помощью зонда инерционного осаждения капель (см. Рисунок 2.15), который вводился в поток через отверстия, расположенные как указано на Рисунке 2.22, а их координаты вдоль оси сопла – в таблице 2.1. Для численного моделирования потока использовалась расчетная сетка, изображенная на Рисунке 2.30. Рассматривались режимы течения в сопле, при которых в минимальном сечении канала достигались критические параметры (число Маха в сечении равно 1). Средний размер крупных капель перед исследуемым каналом, определенный с помощью зонда отпечатков составляет 26 – 30 мкм.

На Рисунке 3.20 представлен фрагмент типичной фотографии образов капель, попавших на поверхность зонда отпечатков. Изображения обрабатывались с помощью специализированного программного продукта ScopePhoto.

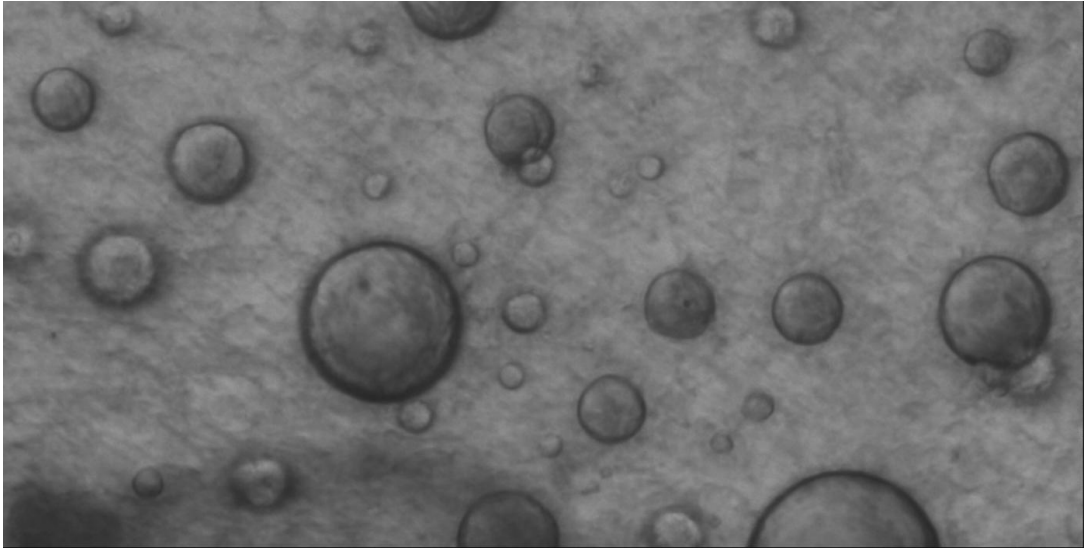


Рисунок 3.20.

Фрагмент фотографии капель на поверхности зонда отпечатков

Определение среднего по концентрации размера капель производилось следующим образом. Серии результатов, полученные по нескольким замерам зондом отпечатков в одной точке, используются как входные данные для обработки.

Результатами обработки являются:

- Распределение диаметров капель по количеству в каждой измеряемой точке.
- Средний диаметр капель по количеству в каждой измеряемой точке.

Для получения распределения диаметров по количеству, задавалась ширина элементарной выборки (s) и диапазон выборки по диаметрам: d_{\min} (минимальный диаметр) и d_{\max} (максимальный диаметр). После чего определялось количество интервалов диаметров распределения:

$$z = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{s}. \quad (3.31)$$

При этом, если число z оказывалось дробным, то оно округлялось до большего целого значения. После чего, для каждой капли определялось, к какому интервалу диаметров она принадлежит. Данная частица считалась попавшей в интервал, если для ее диаметра выполнялось следующее условие:

$$d_{min} + (i - 1) \times s < d_k \leq d_{min} + i \times s, \quad (3.32)$$

где i – номер рассматриваемого интервала диаметров ($i = 1 \dots z$); d_k – диаметр рассматриваемой частицы. Затем для каждого интервала диаметров определялось среднее значение диаметра попавших в него частиц:

$$d_{ni} = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} d_k}{N_i}, \quad (3.33)$$

где N_i – количество капель, попадающих в i -ый интервал диаметров; d_k – диаметр k -ой капли i -го диапазона. После чего для каждого интервала определяется доля всех капель, принадлежащих к интервалу диаметров, по отношению к суммарному количеству выявленных капель.

$$\frac{n}{n_\Sigma} = \frac{N_i}{N_\Sigma}. \quad (3.34)$$

В результате такой обработки получается зависимость: $\frac{n_i}{n_\Sigma} = f(d_{ni})$.

Средний диаметр по количеству определяется следующим образом:

$$d_n = \frac{\sum_{k=1}^{N_\Sigma} d_k}{N_\Sigma}. \quad (3.35)$$

На Рисунке 3.21 представлена фотография капельного потока, засвеченного лазером. Это типичное изображение структуры течения жидкой фазы в исследуемом сопле. На Рисунке также отмечена прямоугольная область, в которой производились измерения параметров жидкой фазы с помощью системы лазерной диагностики «ПОЛИС». Ее геометрические характеристики представлены в описании к Рисунку. Изменение средних по концентрации диаметров исследовалось вдоль оси, расположенной на линии симметрии канала (на ней же расположены отверстия для зонда отпечатков, см. Рисунок 3.21). Для отсеивания мелких капель, каждое мгновенное поле скоростей, определенное корреляционным PIV алгоритмом, фильтровалось по коэффициенту скольжения: вектор отсеивался если величина $v \geq 0,9$.

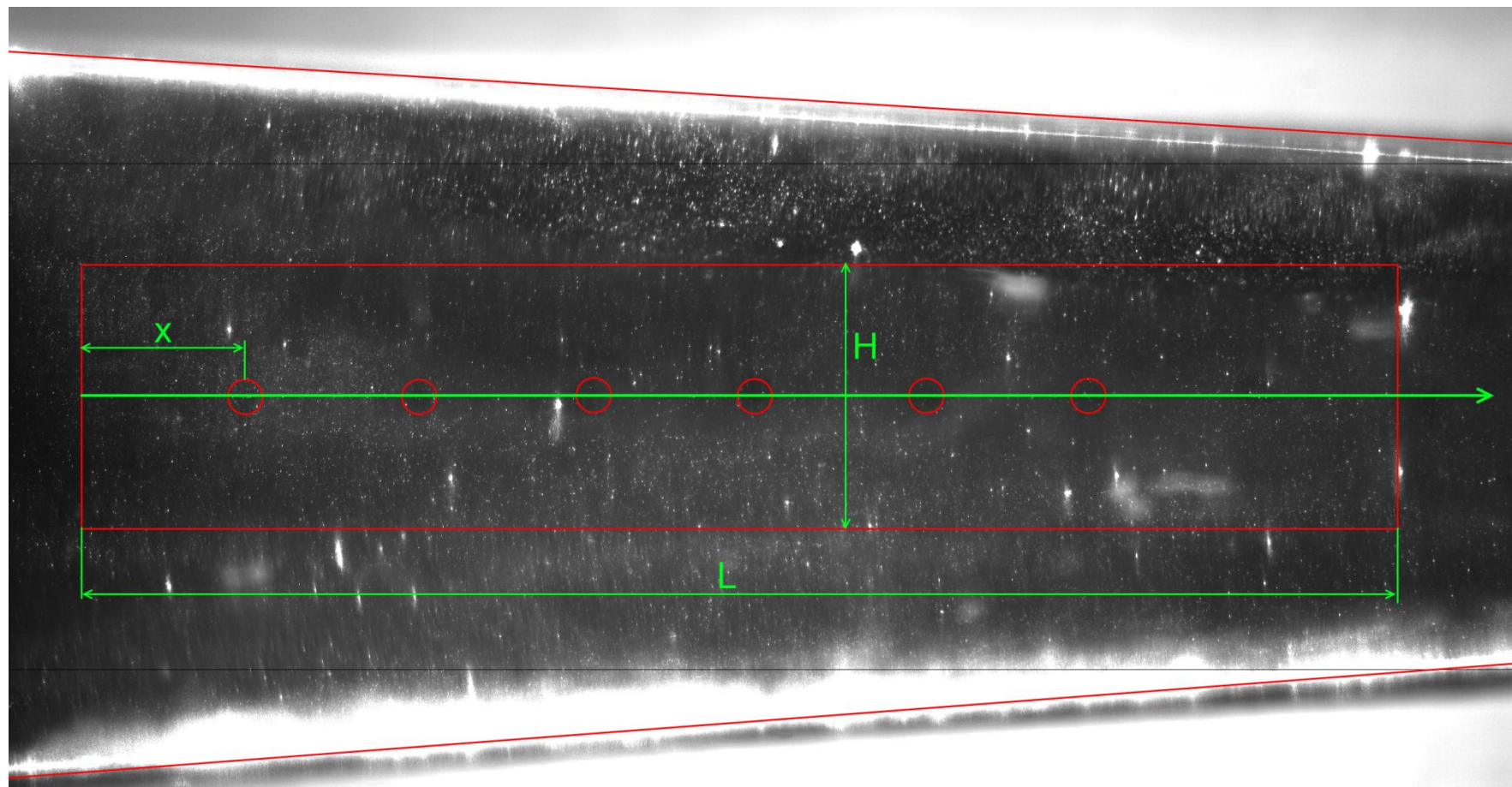


Рисунок 3.21.

Структура капельного потока в суживающемся сопле. $H = 20$ мм; $L = 100$ мм; $x = 10$ мм

На Рисунках 3.22 – 3.24 представлено сравнение результатов измерения средних размеров капель с помощью зонда отпечатков и разработанной методики. Красными областями обозначены зоны нечувствительности методики, о которых будет сказано ниже. По мере движения вдоль канала, средние размеры капель снижаются от 30 до 20 мкм, что связано с дроблением частиц крупных размеров в полидисперсном потоке. Наблюдается достаточно хорошее совпадение практически по всей длине рассматриваемой области, что говорит о корректности применения описанного в данной Главе подхода по определению размеров капель. Максимальное отклонение от эталонных данных, которыми в данном исследовании являются результаты применения зонда отпечатков, составляет 14% (см. $x = 0,02$ м на Рисунке 3.23).

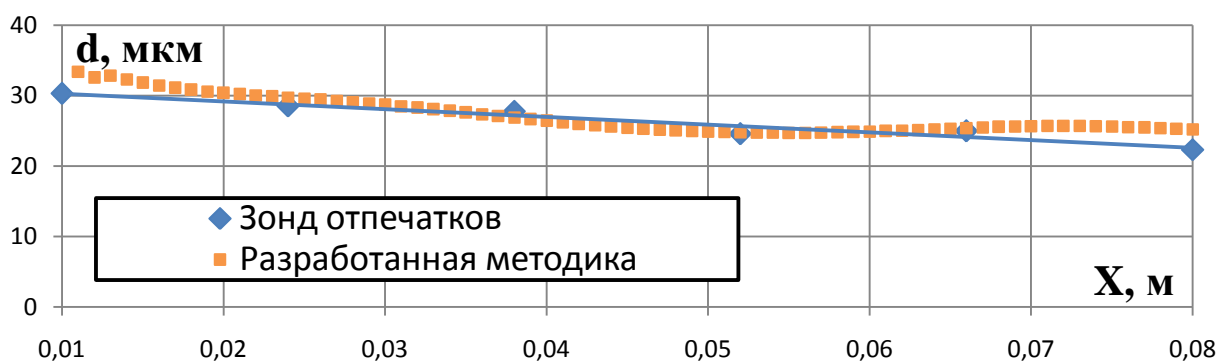


Рисунок 3.22.

Распределение средних размеров капель и градиента ускорения вдоль исследуемой оси для режима $p_0 = 0,085$ МПа, $y_0 = 1\%$

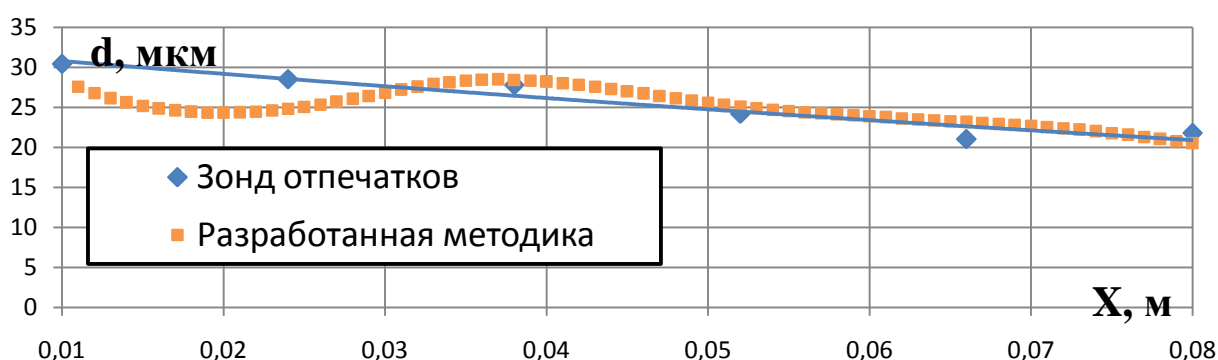


Рисунок 3.23.

Распределение средних размеров капель и градиента ускорения вдоль исследуемой оси для режима $p_0 = 0,08$ МПа, $y_0 = 2\%$

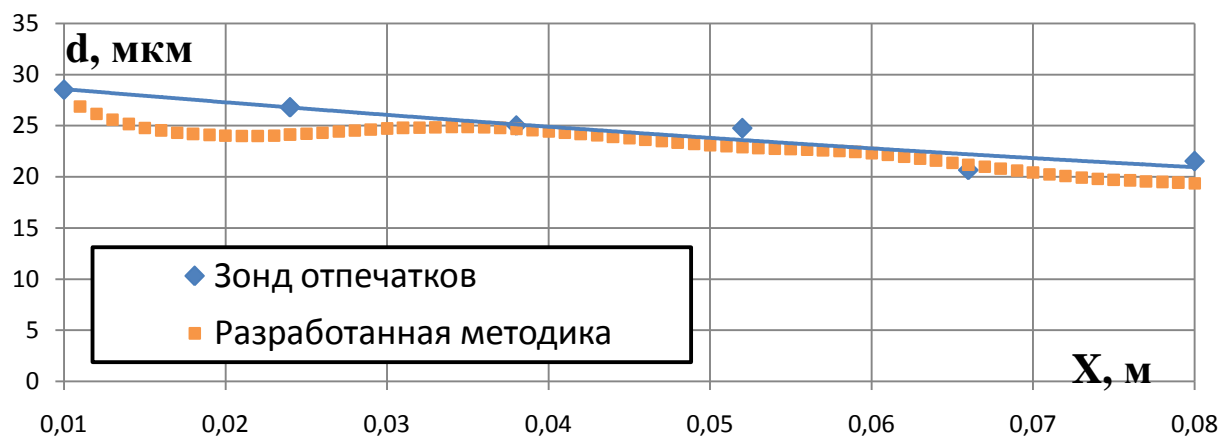


Рисунок 3.24.

Распределение средних размеров капель и градиента ускорения вдоль исследуемой оси для режима $p_0 = 0,04$ МПа, $y_0 = 3\%$

Глава 4. Влияние режимных параметров на характеристики жидкой фазы за сопловой решеткой

Как отмечалось в Главе 1, основным источником эрозионного износа рабочих лопаток являются крупные капли, формирующиеся в каналах сопловой решетки и в осевом зазоре. Крупными частицами будем считать те, которые движутся с существенным скольжением по отношению к основному потоку. При этом их углы выхода могут варьироваться в широком диапазоне. Подобное поведение характерно для капель, размеры которых больше 5 мкм (см. Главу 3).

Основными характеристиками, которые бы в полной мере описывали характер движения жидкой фазы перед рабочей решеткой, являются: коэффициент скольжения по отношению к паровой фазе, размер капель и угол выхода частиц вдоль их траекторий. Система PIV с доработками, описанными в Главе 3, позволяет произвести комплекс измерений, направленных на определение этих величин.

В данной Главе рассматриваются особенности распределения параметров крупной влаги в межосевом зазоре последней ступени турбины. В качестве исследуемого объекта использовался плоский пакет сопловых лопаток, сформированный из профилей типа С-90-15А. Геометрические характеристики представлены на Рисунке 2.22 и в таблице 2.2. Исследования проводились при теоретическом числе Маха за решеткой $M_{1t} = 0,8$. Рассматривалось влияние на характеристики потоков крупных капель таких режимных параметров, как начальная влажность пара (y_0) и отношение плотностей фаз:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{п}}}. \quad (4.1)$$

Величина $\bar{\rho}$ изменялась путем варьирования давления полного торможения потока перед исследуемым каналом. В данном исследовании число Re с изменением давления полного торможения не поддерживалось постоянным, но находилось в области автомодельности.

При проведении исследований, начальная влажность пара варьировалась в широком диапазоне значений: от 3 до 8%. Увеличение влажности производилось

подключением дополнительного блока пародутьевых форсунок, что предотвращало изменение среднемассового начального размера капель, который поддерживался на уровне $d_0 = 26 - 30$ мкм и контролировался с помощью зонда инерционного осаждения, устанавливаемого перед исследуемым каналом.

Дисперсный состав дискретной жидкой фазы, формируемой пародутьевыми форсунками стенда КВП-2, существенно отличается от наблюдаемого в последних ступенях паровой турбины. В соответствии с [112], массовая доля крупной влаги в проточной части турбины не превышает 10%, в то время как в экспериментальном стенде движутся преимущественно крупнодисперсные частицы дискретной фазы. Однако подобное рассогласование в среднемассовых размерах не препятствует исследованию особенностей движения эрозионно-опасных капель в каналах турбомашин, так как в данном случае представляет интерес структура капельного потока в периферийных сечениях, где сконцентрирована основная доля крупных частиц [21].

В данной Главе разделы 4.1 и 4.2 посвящены выявлению основных особенностей распределения параметров крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой с изменением начальной влажности пара. Исследования проводились при постоянной величине $\bar{\rho} = 2581$. В разделе 4.3 рассматривается влияние режимного параметра $\bar{\rho}$ на структуру капельного потока за сопловой решеткой.

4.1. Особенности распределения капельных потоков за сопловой решеткой

Фотографии капельного потока, полученные в результате работы системы лазерной диагностики, позволяют визуально анализировать характер распределения крупных капель в пространстве за сопловой решеткой. На Рисунке 4.1 представлена типичная картина движения влаги в этой области. Основываясь на опыте работы с системой «Полис» [10 – 14, 19, 62, 63, 73- 75, 97], можно формально разделить частицы жидкой фазы на:

1. Мелкодисперсный «туман». Капли малого диаметра формируют структуру, движущуюся в виде засвеченной дымки.

2. Отдельно наблюдаемые капли. Четко просматриваемые образы частиц, которые можно выделить в потоке. Они в большинстве случаев соответствуют крупным каплям.

Данное разделение является нечетким и заключается в визуальном наблюдении. На представленном снимке в результате пост-обработки изображения был удален туман мелкодисперсной влаги, движущейся в ядре потока, кроме того была увеличена яркость фотографии для выделения слабо засвеченных трассеров (поэтому область кромочного следа представляет собой сильно засвеченную область, так как в ней высокая концентрация капель). На основании анализа полученного снимка, можно выделить 2 области, в которых проявляются четкие образы крупнодисперсной влаги:

1. Кромочный капельный след. В данной области крупные частицы образуются в закромочной области при сходе водяной пленки.

2. Зона со стороны спинки лопатки. Как показал визуальный анализ полученных фотографий, в этой области присутствует крупная влага, движущаяся с большими углами выхода.

Таким образом, в рассматриваемом межлопаточном канале из всех потоков крупнодисперсных частиц, выявленных ранее в [15] (см. Рисунок 1.10), визуально проявляются только два.

Для удобства изложения последующего материала, автор будет называть совокупность данных областей капельной структурой. Наличие крупных частиц непосредственно в ядре потока практически не наблюдалось, что свидетельствует об их низкой концентрации в этой зоне.

Распределение коэффициентов скольжения в потоке за сопловой решеткой подтверждает сделанные выводы о локализации областей проявления крупных капель. На Рисунке 4.2 представлено осредненное поле коэффициентов скольжения жидкой фазы за сопловой решеткой при различных значениях начальной влажности. Анализ этих картин позволяет судить о дисперсном составе капель в потоке за сопловой решеткой [31].

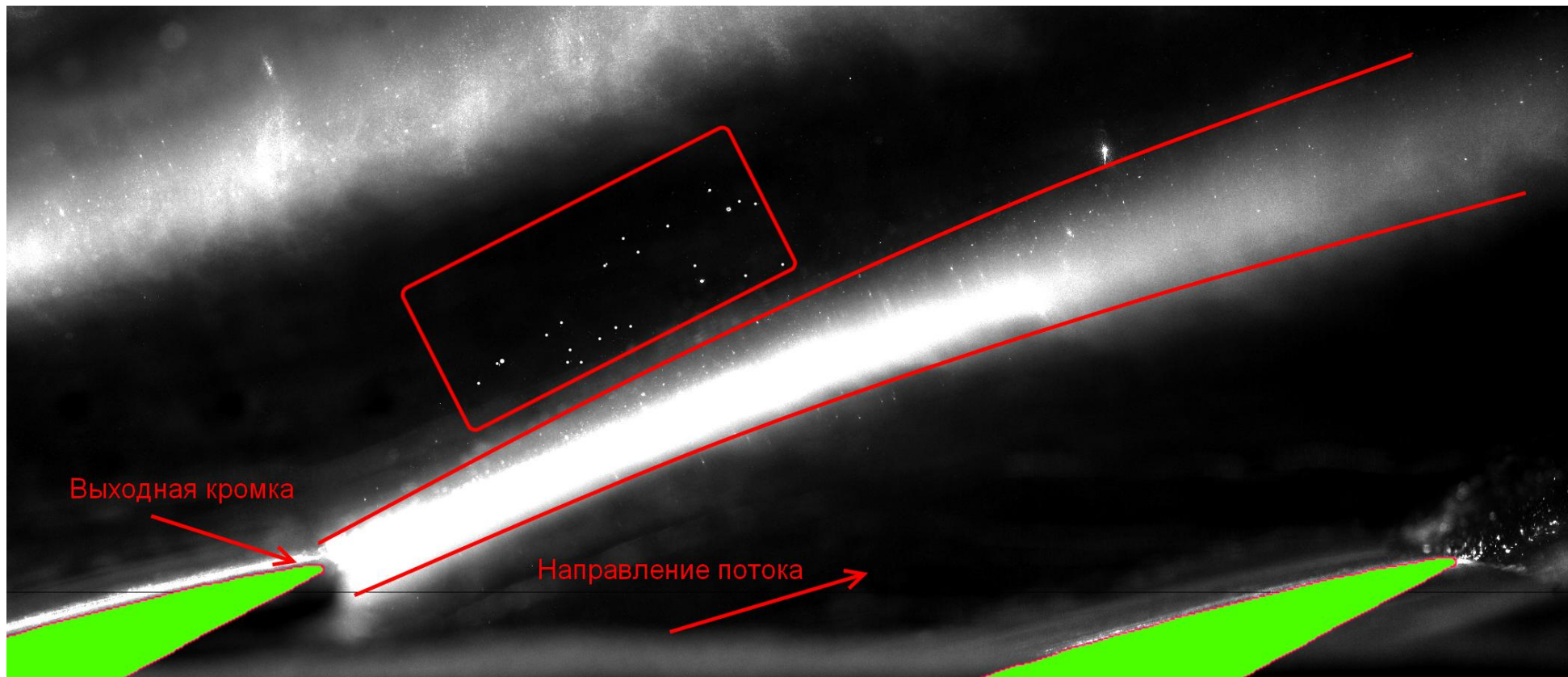


Рисунок 4.1.
Структура капельного потока за сопловой решеткой

В данном случае не производилось отсеивание с фотоснимков «тумана» из мелких капель. Следует заметить, что на Рисунке 4.2 имеет место влияние концентрации крупных капель на статистически осредненную картину течения. При значениях коэффициентов скольжения $\nu = 0,8 - 1$ можно говорить о движении мелкодисперсной влаги, которая распространяется вдоль линий тока основного потока. С уменьшением $\nu < 0,8$ концентрация крупной влаги оказывается достаточной для того, чтобы влиять на структуру капельного потока в рассматриваемой области; в данном случае можно говорить о присутствии в потоке частиц больших размеров.

Предложенные границы были определены на основании анализа множества фотоснимков, полученных системой лазерной диагностики. Аналогичные результаты приведены в [75]. Для этого рассматривалось присутствие отдельных четких образов частиц жидкой фазы на фоне мелкодисперсного тумана. В случае, когда в элементарной области (размеры которой составляют приблизительно 1 мм) на каждом снимке проявлялась хотя бы одна отдельная капля, можно говорить о присутствии крупной влаги. На данный момент имеющееся оборудование лаборатории не позволяет определять концентрацию капель в потоке другими методами.

На основании описанного подхода и в соответствии с результатами, представленными на Рисунке 4.2, можно говорить о том, что крупная влага локализована вблизи кромочного следа. Область, занимаемая капельной структурой, существенно зависит от начальной влажности пара перед исследуемой решеткой.

На всех рассмотренных режимах проявляется ядро потока, в котором движение частиц происходит практически без скольжения, что свидетельствует об отсутствии крупной влаги. Ядро течения (где отсутствуют крупные частицы) при начальной влажности $y_0 = 3,4\%$ сохраняется, хотя по мере удаления от выходной кромки оно сужается. С ростом y_0 потоки крупных капель, сформированные соседними лопатками, начинают расширяться, тем самым сужая

область проявления мелкодисперсной влаги, и на расстоянии $z \approx 0,35b$ можно говорить об их смыкании.

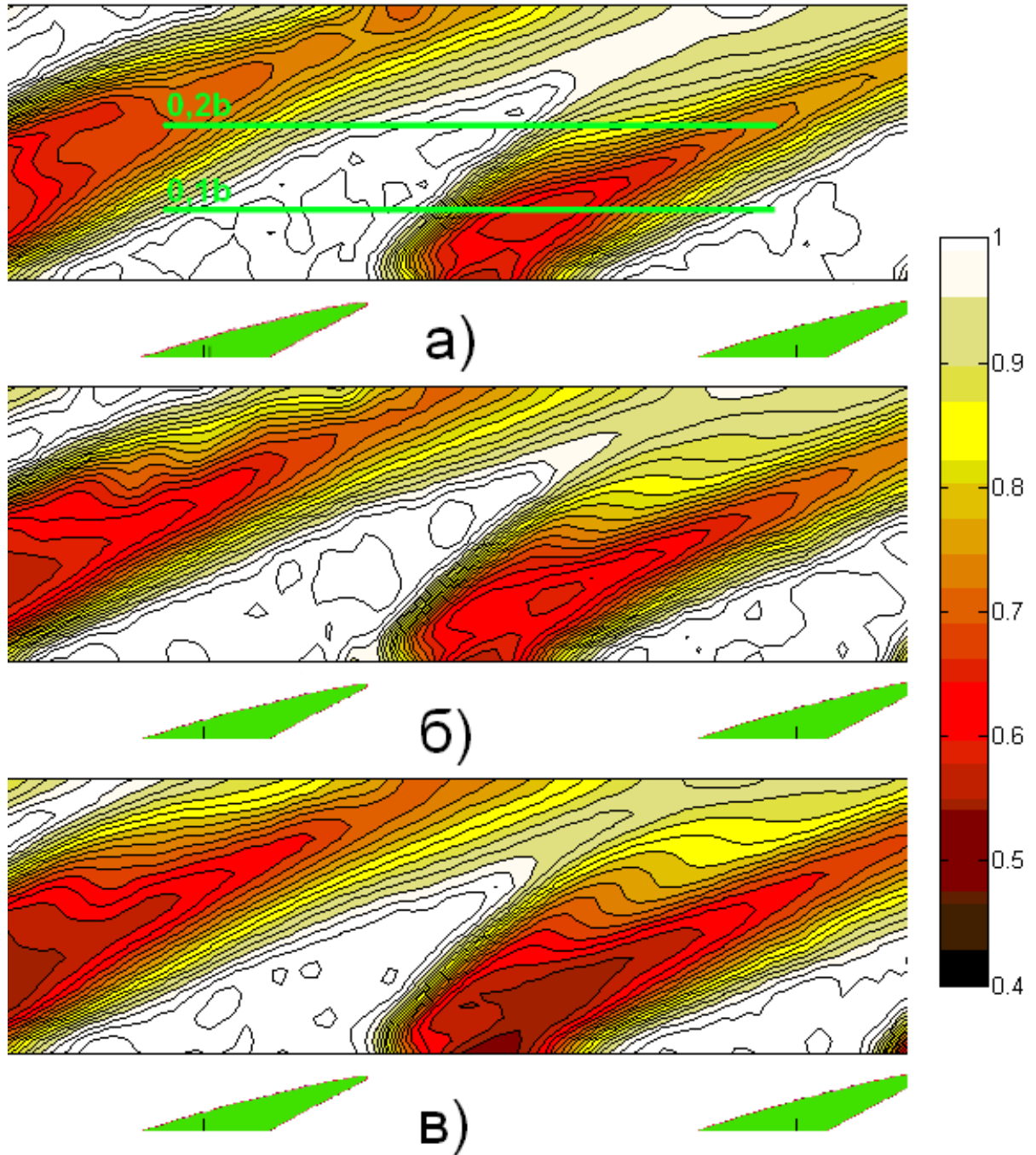


Рисунок 4.2.

Осредненное поле коэффициентов скольжения жидкой фазы за сопловой решеткой. а: $y_0 = 3,4\%$; б: $y_0 = 5,4\%$; в: $y_0 = 8,4\%$

При этом на начальной влажности $y_0 = 8,4\%$ потоки крупнодисперсной влаги смыкаются несколько раньше, чем при $y_0 = 5,4\%$. С изменением y_0

наблюдаются существенные перестроения в значениях ν в области спинки профиля. При этом визуальный анализ фотографий показал, что изменение y_0 не приводит к трансформациям формы кромочного капельного следа.

Ширина капельной структуры непосредственно вблизи выходной кромки практически не изменяется с увеличением начальной влажности. И лишь на некотором расстоянии от фронта решетки вниз по течению происходит ее существенное расширение.

Более подробно характер распределения коэффициентов скольжения влаги можно проанализировать при рассмотрении распределений этого параметра вдоль шага решетки. На Рисунках 4.3, 4.4 представлено изменение ν вдоль шага, на расстоянии $z = 0,1b$ и $z = 0,2b$ от выходной кроки лопатки (расположение линий см. Рисунок 4.2, а). Здесь и далее:

$$\bar{x} = \frac{x}{t}, \quad (4.2)$$

где x – координата вдоль шага решетки, t – величина шага решетки. Необходимо отметить, что значения коэффициентов скольжения в области ядра потока ($\bar{x} = 0 - 0,4$ на Рисунке 4.3) оказались выше 1. Это объясняется тем, что в этой области движется только мелкодисперсная влага, которая, как отмечалось выше, на фотоснимках представляется в виде дымки, а не отдельных образцов капель. Подобные образования корреляционный метод PIV обрабатывает с погрешностью, кроме того, ошибка присутствует и в результатах численного моделирования движения сплошной среды.

На расстоянии $0,1b$ область капельной структуры распространяется практически на половину шага решетки. Наблюдается 2 минимума по величине ν , которые расположены на $\bar{x} = 0,45 - 0,5$ и $\bar{x} = 0,65$. Первый экстремум соответствует области со стороны спинки лопатки (см. Рисунок 4.1), а второй – кромочному капельному следу. Как видно из представленного распределения, с увеличением начальной влажности первый минимум смещается от выходной кромки. При этом уменьшается величина коэффициентов скольжения, что

свидетельствует о повышении концентрации крупных капель в этой области потока.

В кромочном капельном следе с увеличением начальной влажности также происходит понижение коэффициентов скольжения, что свидетельствует об увеличении концентрации и размеров крупных капель в нем. Подобное изменение характеристик объясняется увеличением расхода в водяной пленке на поверхности лопатки, которая впоследствии дробится за выходной кромкой.

Помимо изменений непосредственно минимумов коэффициентов скольжения, с ростом влажности происходит перестроение дисперсного состава как на границах капельного следа со стороны спинки ($\bar{x} = 0,4 - 0,45$), так и на вогнутой поверхности ($\bar{x} = 0,7 - 0,9$) профиля на линии 0,1b. С ростом y_0 резко снижаются коэффициенты скольжения капель в области $\bar{x} = 0,4 - 0,45$ (со стороны спинки), что говорит о существенном перестроении в дисперсном составе – увеличивается концентрация и размер крупнодисперсной влаги. В зоне, близкой к вогнутой поверхности профиля уменьшение ν наблюдается при переходе от $y_0 = 5,4\%$ к $y_0 = 8,4\%$.

Несмотря на наблюдаемые перестроения в дисперсном составе влаги, изменение начальной влажности не приводит к существенному расширению зоны присутствия крупных капель на линии 0,1b. Важно отметить, что четкая по коэффициентам скольжения граница капельной структуры наблюдается только в области со стороны спинки, в то время как вблизи вогнутой поверхности профиля она существенно размыта.

При удалении от выходной кромки лопатки (линия 0,2b см. Рисунок 4.4) наблюдается некоторое выравнивание скоростей капельной среды – происходит ускорение дискретных частиц под воздействием основного потока. В то же время зона движения мелкодисперсной влаги сужается. При этом характер распределения коэффициентов скольжения указывает на расширение капельной структуры как со стороны вогнутой поверхности, так и со стороны спинки.

Влияние начальной влажности на скоростные характеристики капель вдоль данной линии проявляется в значительно большей степени, чем на линии 0,1b. Особенно четко это наблюдается в области вблизи спинки профиля ($\bar{x} = 0,72$) - увеличение y_0 от 3,4% до 8,4% приводит к уменьшению коэффициентов скольжения практически на 20%. Данный результат говорит о том, что в рассматриваемой зоне существенно изменяется концентрация крупнодисперсной влаги с изменением начального состояния пара.

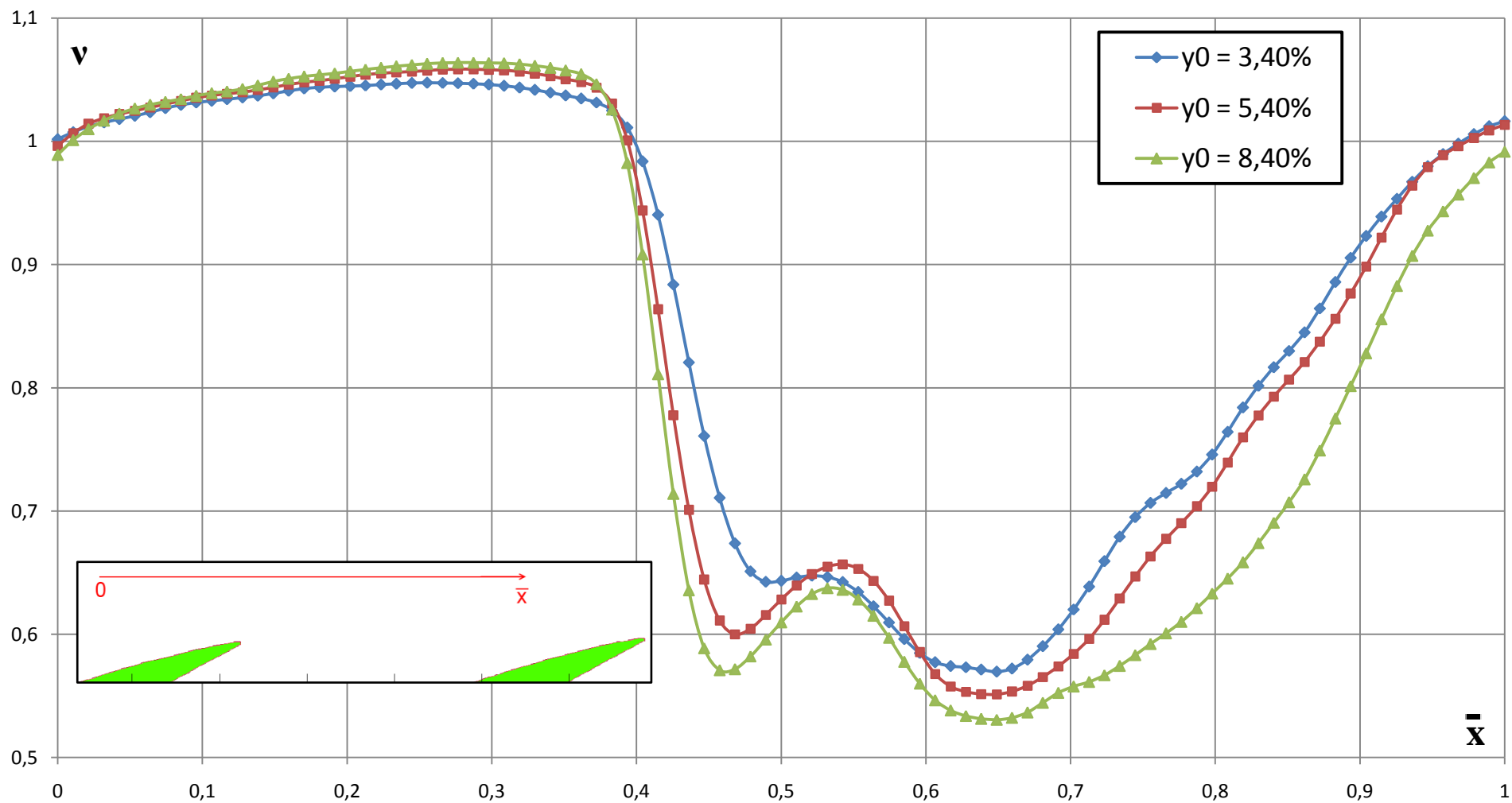


Рисунок 4.3.

Распределение коэффициентов скольжения вдоль шага решетки на расстоянии $0,1b$

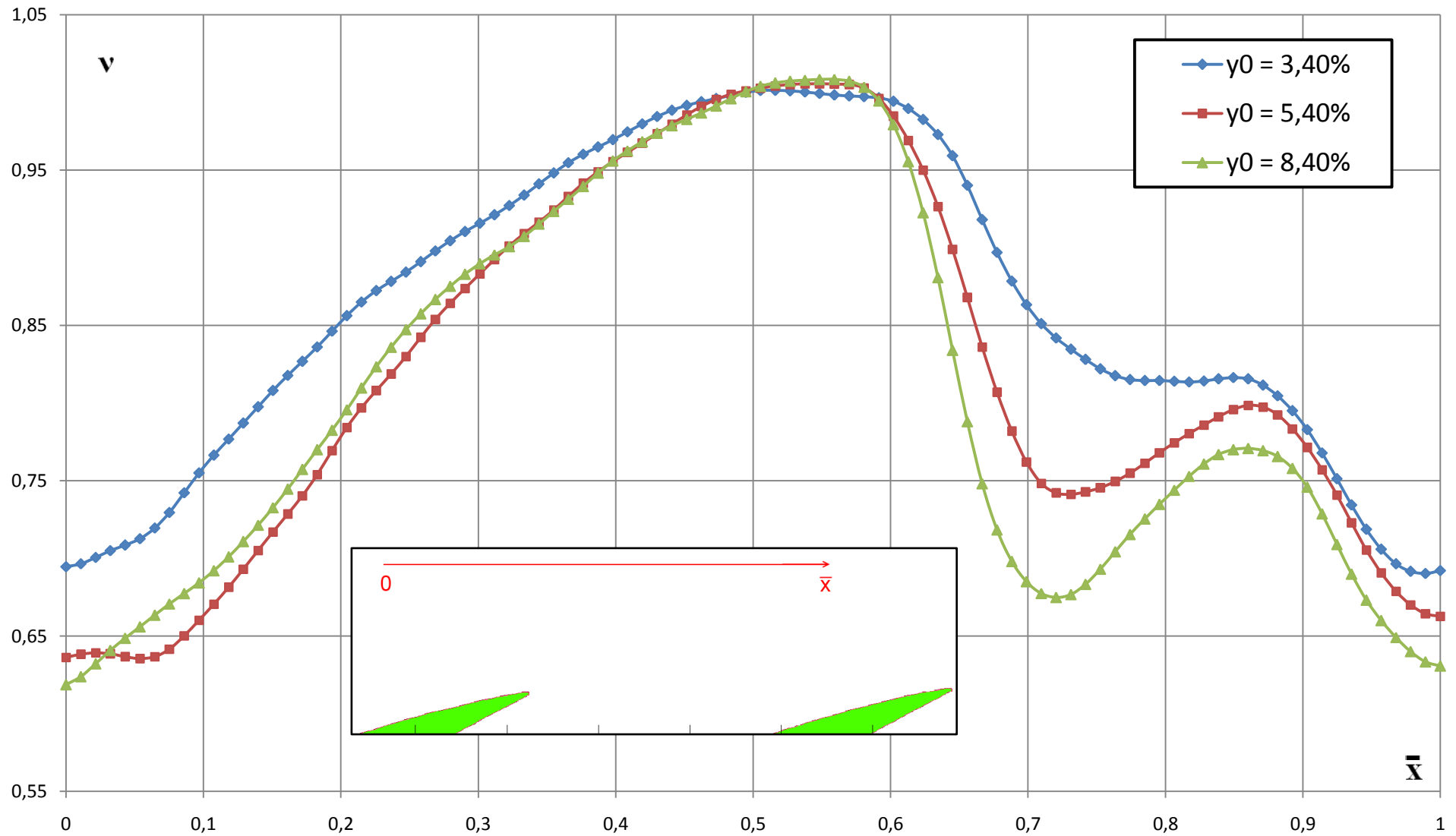


Рисунок 4.4.

Распределение коэффициентов скольжения вдоль шага решетки на расстоянии $0,2b$

Представленный анализ распределения коэффициентов скольжения в потоке показал, что за сопловой решеткой присутствует несколько источников крупных капель. Несмотря на то, что четкая граница между ними отсутствует, представленные на Рисунках 4.3 и 4.4 данные указывают на существование 2-х минимумов в скольжении фаз. Они, как говорилось выше, соответствуют кромочному капельному следу и области вблизи спинки лопатки.

Кроме того, наблюдается протяженная размытая граница капельного следа со стороны вогнутой поверхности профиля. Подобный характер поведения коэффициентов скольжения может свидетельствовать о проявлении третьего источника крупнодисперсной влаги со стороны вогнутой поверхности.

Имеющиеся данные о векторных полях жидкой фазы позволяют выявить природу каждого отдельного источника крупных частиц в потоке путем анализа их траекторий движения, рассчитанных на основе статистически осредненной картины течения.

4.2. Характеристики крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой

Исходные точки для расчета траекторий капель расположены в области локализации капельной структуры за сопловой решеткой, выявленной в предыдущем разделе. При этом, для определения характеристик только крупных частиц (как отмечалось в Главе 3), производилась дополнительная пост-обработка мгновенных полей скоростей для отсеивания мелкодисперсной влаги. Критерием фильтрации является величина коэффициента скольжения: при $v > 0,8$ вектор частицы отсеивается. На основе обработанных мгновенных полей скоростей производилась статистическая обработка [57] для получения осредненной картины течения.

На Рисунке 4.5 представлена форма траекторий крупнодисперсной влаги при различной начальной влажности пара. Стоит отметить, что применение системы лазерной диагностики позволило впервые получить эти данные. Точка 3 соответствует центру кромочного капельного следа, а точки 1 и 5 расположены на границах рассматриваемой капельной структуры. Для сравнительного анализа на Рисунок 4.5 добавлена траектория капель, формирующих мелкодисперсный

«туман» в ядре потока. Частицы подобных размеров двигаются вдоль линий тока пара со скоростями основного потока. Из Рисунка видно, что траектории имеют криволинейную форму и направлены в сторону уменьшения угла выхода капель; при этом с увеличением начальной влажности пара угол выхода частиц дискретной фазы увеличивается. Особенно явно изменение направления движения с увеличением y_0 наблюдается для капель, движущихся со стороны спинки профиля (точки 1 и 2) и внутри кромочного капельного следа (точка 3), в то время как траектории, исходящие из других точек практически не расслаиваются.

Капли, движущиеся вдоль траектории, исходящей из точки 1 (область со стороны спинки), имеют углы выхода, равные $37-40^\circ$ вблизи выходной кромки; при этом угол отклонения жидкой фазы от паровой, определяемый по формуле:

$$\Delta\alpha = \alpha_{1к} - \alpha_{1п}, \quad (4.3)$$

(где $\alpha_{1к}$ - угол выхода капли, а $\alpha_{1п}$ - угол выхода пара) составляет $22-23^\circ$. На Рисунке 4.6 представлено распределение коэффициентов скольжения и углов отклонения жидкой фазы на траектории, исходящей из точки 1. В качестве оси абсцисс используется безразмерное расстояние от выходной кромки \bar{z} .

Увеличение начальной влажности в рассматриваемой области от $y_0 = 3,4\%$ до $y_0 = 8,4\%$ ведет к росту углов выхода капель (вблизи выходной кромки на 3°) и незначительному снижению их коэффициентов скольжения (вблизи выходной кромки на $0,02$). Это свидетельствует о минимальном изменении дисперсного состава крупнодисперсной влаги в этой зоне. На всем протяжении своего пути капли ускоряются основным потоком, при этом различие в углах фаз уменьшается.

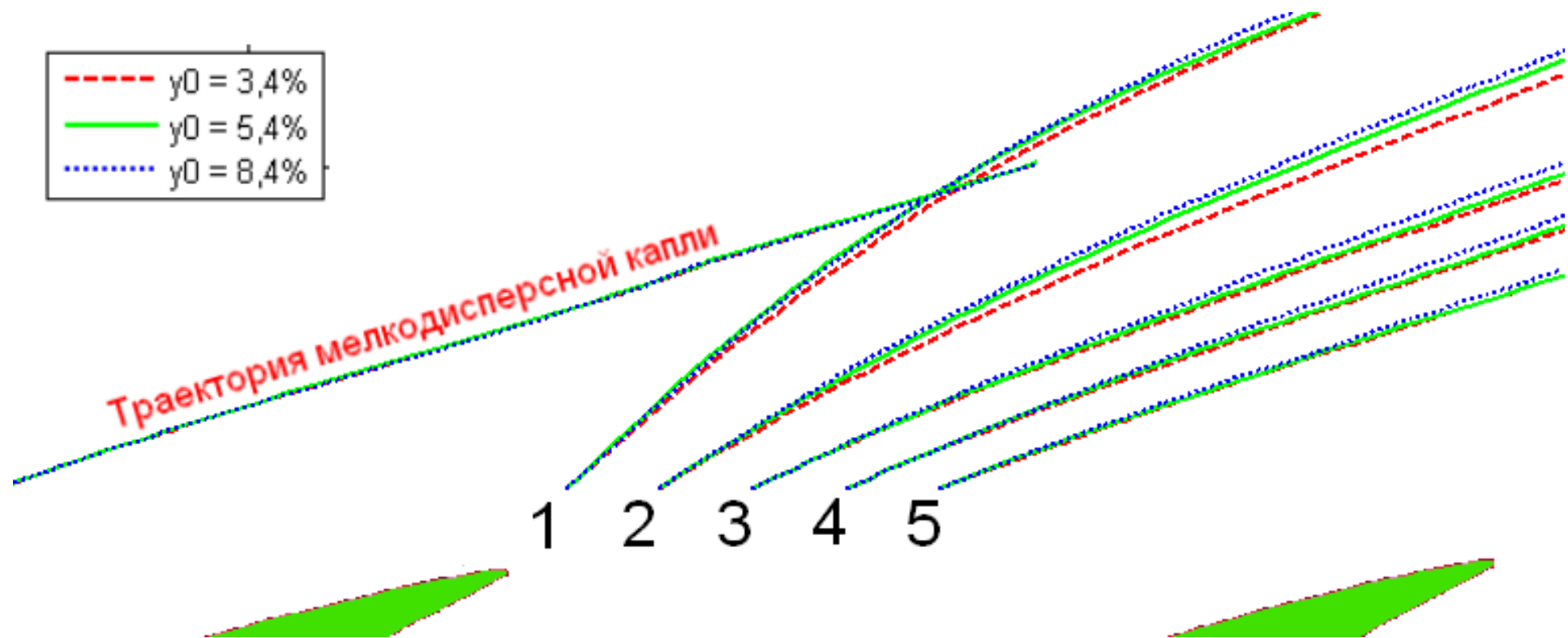


Рисунок 4.5.

Траектории крупных капель за решеткой при различной начальной влажности

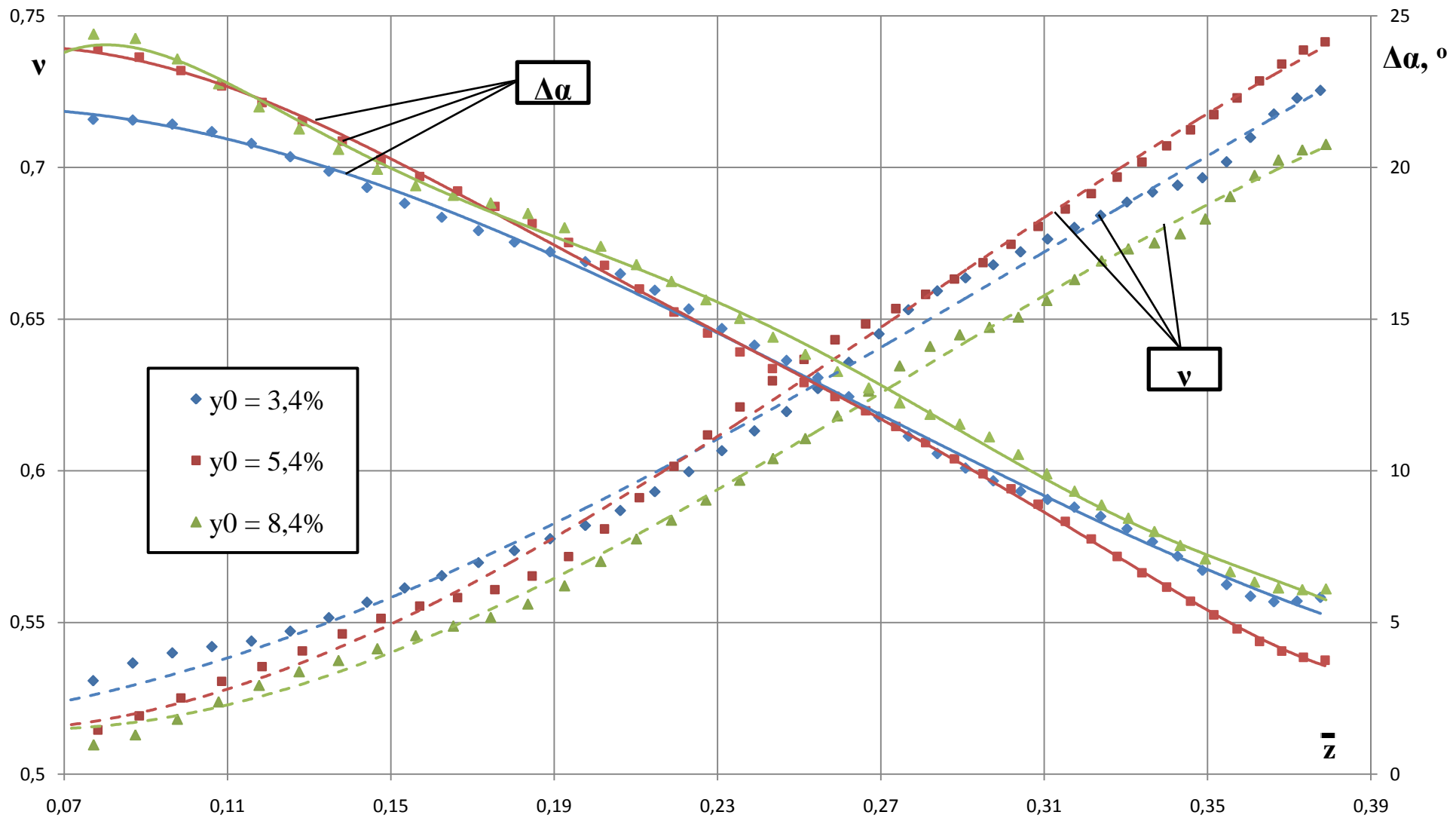


Рисунок 4.6.

Распределение коэффициентов скольжения и углов отклонения капель вдоль траектории, исходящей из точки 1

Имеющиеся на данный момент теоретические и экспериментальные данные [21] указывают на то, что дискретные частицы со стороны спинки лопатки должны быть сформированы при срывных явлениях на смоченной поверхности спинки лопатки в диффузорной области. В таком случае подобные процессы должны проявляться в косом срезе решетки как визуально - в виде четких образов дискретных частиц (см. Рисунок 4.1), так и на распределении коэффициентов скольжения - в виде области пониженных значений вблизи спинки (см. Рисунок 4.2). Однако эти эффекты не были установлены. Крупные капли со стороны спинки профиля проявляются на некотором расстоянии от выходной кромки.

Характер направления траектории, исходящей из точки 1, вблизи выходной кромки говорит о том, что капли, летящие вдоль нее, попадают в рассматриваемую область из межлопаточного канала со стороны вогнутой поверхности, *то есть пересекают кромочный след*. Таким образом, источник крупнодисперсной влаги, наблюдаемой за сопловой решеткой со стороны спинки профиля (см. Рисунок 4.1), расположен перед выходной кромкой лопатки. Существует сразу несколько возможных процессов генерации крупных капель в потоке, которые могут быть причиной наблюдаемой картины [81, 21]:

1. Поток первичной влаги, проходящей канал без контакта с его поверхностями.
2. Поток капель, сформированных при срыве водяной пленки с поверхности спинки в области максимальной кривизны профиля.
3. Сложные процессы отражения и выбивания капель с поверхностей жидких пленок, текущих по спинке профиля.

Для реализации двух последних процессов необходимо развитое пленочное течение на поверхностях лопатки [81]. Однако при рассматриваемых режимах течения (давлении полного торможения и теоретическом числе Маха за решеткой) на начальных влажностях $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 5,4\%$ количество оседающих на спинку профиля частиц недостаточно для формирования устойчивой водяной пленки. Данный вывод был сделан на основе визуального наблюдения за исследуемым объектом во время экспериментальных испытаний. Таким образом,

в данном случае крупные капли, движущиеся со стороны спинки лопатки, являются первичной влагой, проходящей межлопаточный канал без контакта с его стенками и пересекающей кромочный капельный след. При этом вдоль траектории 1 могут также двигаться частицы жидкости, выбитые первичной влагой из кромочного капельного следа.

Имеющиеся данные позволяют проанализировать движение полидисперсной среды в межлопаточном канале, основываясь на математическом моделировании траекторий капель различных размеров путем решения уравнения (3.1). Для этого использовалась математическая модель Discrete Phase Model (DPM), интегрированная в CFD код Ansys Fluent. На Рисунке 4.7 представлены траектории капель полидисперсного потока в исследуемой решетке. Необходимо отметить, что в данном расчете не учитываются процессы дробления и коагуляции капель, отрыва водяных пленок и взаимодействия частиц с поверхностью профиля.

Частицы дискретной фазы, проходящие межлопаточный канал без контакта с его поверхностью, имеют диаметры $d < 20$ мкм, все остальные осаждаются на профиле. При этом, как видно из результатов расчета, капли диаметром 10 – 20 мкм пересекают кромочный след лопатки со стороны вогнутой поверхности. Таким образом, можно сделать вывод, что крупная влага, наблюдаемая со стороны спинки лопатки, формируется за счет потока первичных капель, образованных перед исследуемой решеткой пародутьевыми форсунками экспериментального стенда.

На Рисунке 4.8 представлены средние по концентрации размеры капель вдоль траектории 1 (см. Рисунок 4.5). Дисперсный состав жидкой фазы определен с помощью методики, описанной в Главе 3. Величина d вблизи выходной кромки с ростом начальной влажности практически не изменяется (размеры варьируются в пределах 1-2 мкм). По мере удаления частиц от сопловой решетки происходит некоторое снижение средних диаметров, что вызвано в первую очередь слиянием рассматриваемой траектории с линиями тока других потоков крупнодисперсных капель (см. Рисунок 4.7). Средний размер частиц дискретной фазы в

рассматриваемой области лежит в диапазоне 15 – 10 мкм, что подтверждает результаты расчетного исследования, представленные на Рисунке 4.7. На расстоянии $z \approx 0,3b$ от выходной кромки наблюдается тенденция к росту средних диаметров дискретных частиц, что, по всей видимости, свидетельствует об интенсификации процессов коагуляции капель [29], а также началом смыкания областей капельной структуры, образованной в соседних каналах. Однако необходимо дополнительное исследование для подтверждения данного предположения.

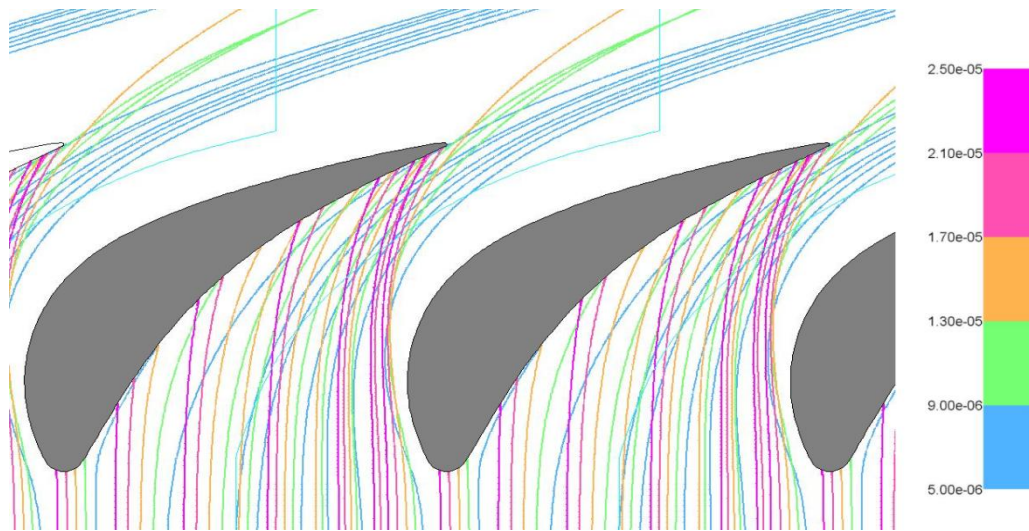


Рисунок 4.7.

Траектории капель различного размера в исследуемом канале

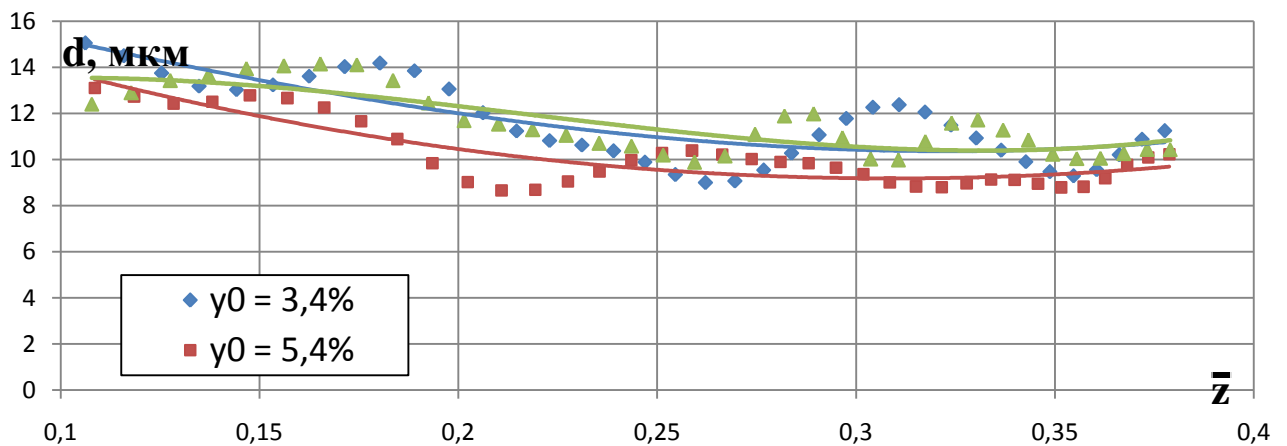


Рисунок 4.8.

Распределение средних по концентрации размеров капель вдоль траектории 1 при различной начальной влажности

Применение расчетно-экспериментального метода при исследовании полидисперсного потока позволяет анализировать характер механического межфазного взаимодействия, которое проявляется при скольжении капель относительно основного потока. Данный подход основан на анализе условий, в которых движутся частицы, с использованием критериальной зависимости [117]:

$$We_{кр} = f(On), \quad (4.4)$$

где $We_{кр}$ - критическое число Вебера, при котором происходит разрушение капель; On - число Онезорге, характеризующее соотношение между силами поверхностного натяжения и диссипативными силами. Необходимо отметить, что на рассматриваемых режимах величина $We_{кр}$ напрямую определяется числом Онезорге. Значения We и On определяются как:

$$We = \frac{\rho_{п}(c_{п}-c_{к})^2 d}{\sigma}, \quad (4.5)$$

$$On = \frac{\mu_{к}}{(\rho_{к} d \sigma)^{0,5}}, \quad (4.6)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения воды; $\mu_{к}$ - динамическая вязкость воды. В случае превышения We критического значения интенсифицируются процессы дробления капель. Вдоль траектории, исходящей из точки 1, величина On не превышает 0,1, что соответствует $We_{кр} = 12$. При этом по мере движения дискретных частиц значение We не превышает 6. Таким образом, в рассматриваемой области механического дробления капель не происходит.

Движение влаги внутри кромочного капельного следа, помимо ускорения основным потоком, сопровождается сложными процессами взаимодействия с вихревыми дорожками, которые вызывают интенсификацию дробления и коагуляции частиц дискретной фазы [14]. Осредненные скоростные характеристики капель вдоль траектории 3 (см. Рисунок 4.5), расположенной внутри кромочного капельного следа, представлены на Рисунке 4.9. Эти результаты в полной мере характеризуют те процессы, которые протекают в кромочном следе. Повышение начальной влажности приводит к снижению коэффициентов скольжения капель вдоль всей траектории, что свидетельствует о росте средних размеров и концентрации крупных капель.

Угол отклонения капель (см. Рисунок 4.9) непосредственно за выходной кромкой с увеличением начальной влажности изменяется незначительно: от 4° до $4,5^\circ$, а максимальный рост $\Delta\alpha$ составляет $1,25^\circ$. По мере движения капель вдоль траектории происходят процессы разгона и дробления частиц, что приводит к выравниванию направления их движения по отношению к основному потоку и способствует уменьшению $\Delta\alpha$. Важно отметить, что распределение $\Delta\alpha$ в кромочном капельном следе совпадает для режимов с начальной влажностью 3,4% и 5,4% при достижении $y_0 = 8,4\%$ характер изменения рассогласованности в углах выхода фаз изменяется.

В данном случае изменение скоростных характеристик жидкой фазы при увеличении начальной влажности пара напрямую связано с процессами образования крупнодисперсной влаги за выходной кромкой. Формируемые в этой области капли являются результатом процесса разрушения водяной пленки при сходе с поверхности профиля. Ее расход определяется массой оседающих на лопатку частиц первичной влаги, количество которых напрямую зависит от начальной влажности парового потока. Как показано в [14], характеристики кромочного следа существенно зависят от структуры парокapельного пограничного слоя. Возможны 2 случая: парокapельный слой без развитой водяной пленки и с пленкой. Режим течения в пристеночной области и определяет особенности распределения скоростных параметров капель за кромкой. Для получения полной картины поведения частиц жидкой фазы в кромочном следе, результаты, представленные на Рисунке 4.9, необходимо дополнить данными о характере формирования крупнодисперсной влаги в этой области.

Система «ПОЛИС» позволяет визуально анализировать механизм влагообразования путем фотографирования засвеченных лазером дискретных частиц и капельных образований.

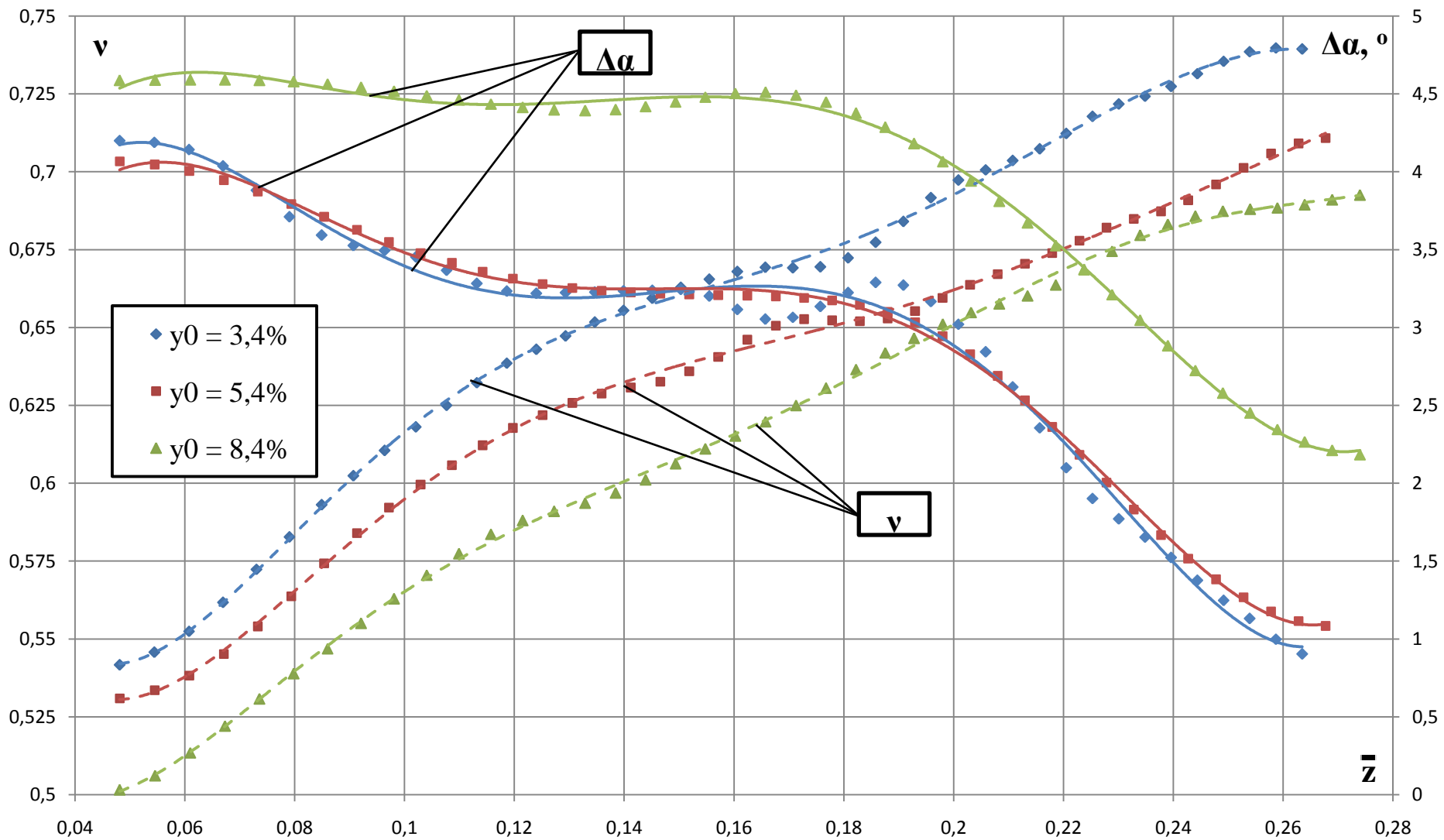


Рисунок 4.9.

Распределение коэффициентов скольжения и углов отклонения капель вдоль траектории, исходящей из точки 3

На Рисунке 4.10 представлены фотографии строения капельного потока вблизи выходной кромки при различных начальных влажностях пара. Основной особенностью наблюдаемых картин является структурное изменение течения дискретной фазы при сходе с поверхности лопатки.

При начальной влажности $y_0 = 3,4\%$ сход с выходной кромки происходит как отдельными дискретными частицами, так и бесформенными порциями (кластерами). При этом непосредственно схода сплошной водяной пленки на данном режиме не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что при начальной влажности $y_0 = 3,4\%$ массовой составляющей капель, оседающих на поверхность лопатки недостаточно для формирования развитого пленочного течения. При повышении y_0 до $5,4\%$ концентрация частиц, засвеченных лазером, увеличивается, однако на кадрах продолжают наблюдаться отдельные образы капель. В то же время периодически проявляются небольшие области, полностью засвеченные лазером, что свидетельствует о проявлении язычков сходящей с лопатки водяной пленки. Можно говорить о том, что при $y_0 = 5,4\%$ на поверхности лопатки уже начинает формироваться сплошная пленка. При повышении начальной влажности до $y_0 = 8,4\%$ язычки сходящей пленки имеют более вытянутую форму, и их наличие проявляется на фотографиях заметно чаще, чем на предыдущем режиме. В данном случае можно говорить о развитом пленочном течении в парокапельном пограничном слое. Важно отметить, что на рассмотренных режимах, сход язычков проявляется только с вогнутой поверхности профиля (засветка сплошной структуры на Рисунке 4.10 начинается с вогнутой стороны). Процесс схода влаги со спинки профиля на всех рассматриваемых режимах имел не периодичный характер, и представлял собой срыв отдельных частиц или их кластеров при этом сход язычков сплошной пленки на рассматриваемых режимах не наблюдался. Кроме того, при начальной влажности $y_0 = 8,4\%$ количество фотографий, на которых было замечено формирование капель в кромочном следе со стороны спинки, существенно возросло по отношению к режимам с малыми значениями y_0 . Полученные данные

визуального анализа согласуется с имеющимися результатами экспериментальных исследований [14, 61, 80, 81].

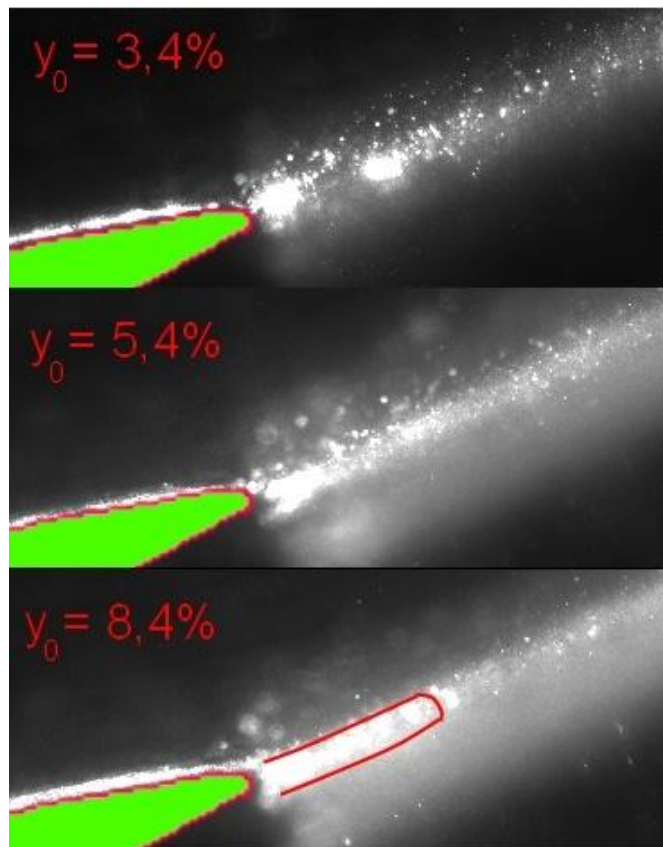


Рисунок 4.10.

Форма капельной структуры за выходной кромкой при различных начальных влажностях

Наблюдаемая картина формирования крупнодисперсной влаги в кромочном следе явно связывает отмеченное выше перестроение дисперсного состава влаги с фактом образования развитого пленочного течения на поверхности лопатки. Опыты, проведенные в [14], отчетливо показали, что изменение расхода жидкости в парокapельном слое существенно влияет на размеры образованной крупнодисперсной влаги в кромочном следе.

Изменение дисперсного состава вдоль рассматриваемой траектории представлено на Рисунке 4.11. С увеличением y_0 вблизи выходной кромки наблюдается значительный рост средних по концентрации размеров капель от 85

мкм до 115 мкм. Важно отметить, что начальная точка исследуемого движения частиц жидкой фазы расположена на некотором отдалении от выходной кромки профиля, поэтому в данном случае нельзя говорить о размерах капель, формируемых непосредственно за лопаткой.

По мере удаления от фронта решетки происходит активное дробление капельного потока за счет его ускорения паровой фазой, а также в результате взаимодействия со сходящими с выходной кромки вихрями.

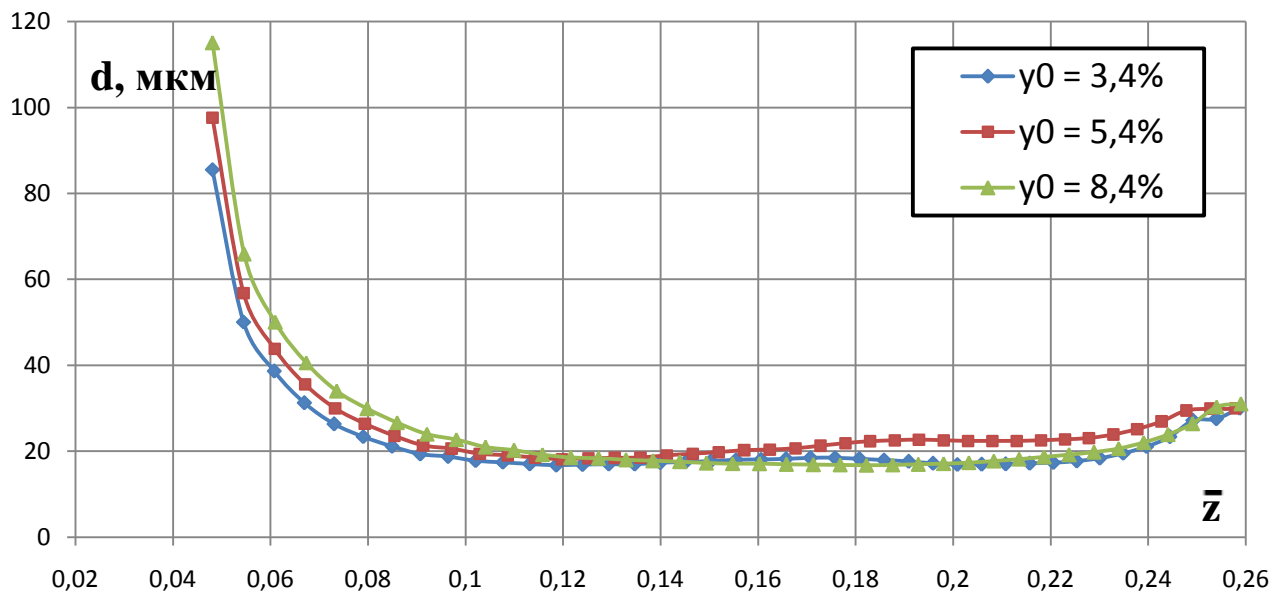


Рисунок 4.11.

Распределение средних по концентрации размеров капель вдоль траектории 3

На расстоянии $z = 0,14b$ дисперсный состав перестает существенно изменяться; в этой зоне средний размер крупных капель составляет 20 мкм для всех рассматриваемых режимов. В области безразмерных координат $\bar{z} = 0,23$ начинается плавное увеличение средних диаметров дискретных частиц, что связано с интенсификацией процессов коагуляции капель.

Важно отметить, что данные (см. Рисунок 4.11), полученные с помощью разработанной экспериментально-расчетной методики определения размеров капель, не дают полной картины протекающих в кромочном следе процессов. Их необходимо дополнить результатами статистического анализа скоростных характеристик капель в этой области. Исследование характера трансформации

дисперсного состава жидкой дискретной фазы по мере удаления от выходных кромок сопловых лопаток проводилось по мгновенным полям скоростей, определенных корреляционным методом PIV. В элементарных областях (размером 1 мм на 1 мм) производился расчет распределений коэффициентов скольжения. Рассматриваемые зоны расположены на траектории каплей, исходящей из точки 3. На Рисунке 4.12 представлено распределение коэффициентов скольжения в трех точках. По оси абсцисс отложена величина v , а по оси ординат – отношение количества капель с данной скоростью к суммарному количеству векторов, определенных алгоритмом.

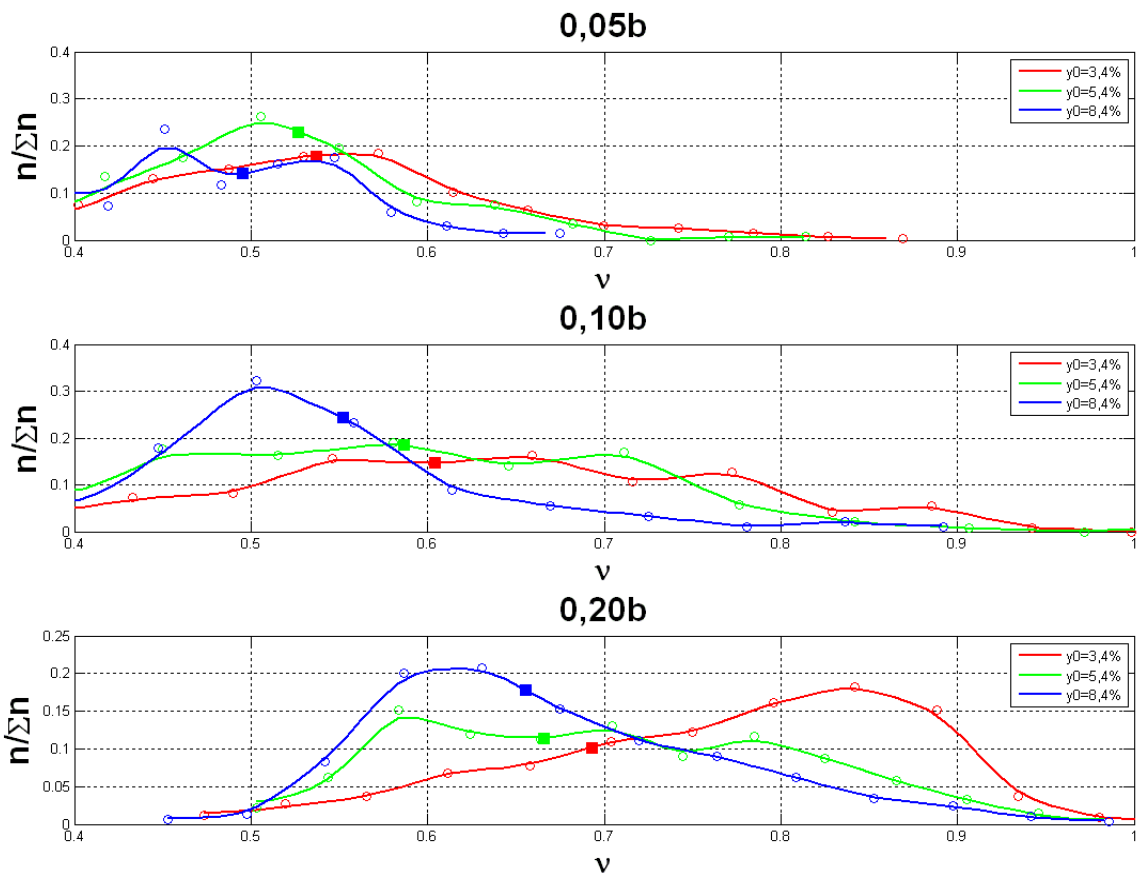


Рисунок 4.12.

Распределение коэффициентов скольжения в элементарных областях на траектории, исходящей из точки 3

Границы статистической выборки и число интервалов группирования экспериментальных данных определялись на основе [49]. На распределениях закрашенным маркером обозначены коэффициенты скольжения,

соответствующие каплям, размеры которых определены на Рисунке 4.11. Представленная картина позволяет качественно охарактеризовать процессы формирования дисперсного состава дискретной среды за выходной кромкой лопатки.

Как видно из Рисунка, в точке на расстоянии $z = 0,05b$ с изменением начальной влажности происходит перестроение дисперсного состава капельного потока. Рост y_0 от 3,4% до 5,4% приводит к смещению максимума концентрации к области более крупных капель, что вызвано в первую очередь ростом расхода влаги, оседающей на стенках профилей. Это способствует формированию тонкой пленки, срыв которой с выходной кромки образует капли большего размера, чем при малой влажности. При переходе от начальной влажности $y_0 = 5,4\%$ до $y_0 = 8,4\%$ происходит существенное перераспределение дисперсного состава жидкой фазы: на рассматриваемом распределении формируется двухпиковая структура. Это говорит о проявлении второго источника образования крупной влаги, который, возможно, является процессом схода капель со спинки профиля. Как отмечалось выше (см. Рисунок 4.10), сход крупных частиц со спинки лопатки практически не наблюдается при начальных влажностях $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 5,4\%$. Это вызвано в первую очередь следующими факторами:

- Особенности геометрии профиля [81]: участок спинки в косом срезе лопатки расположен в «аэродинамической тени» для движущихся со стороны входа в канал капель (см. Рисунок 4.7).
- Режим течения пленки на вогнутой поверхности лопатки. Известно, что при развитом пленочном течении, когда реализуются волновые процессы на ее поверхности [64], срываемая с пленки влага может попасть на спинку профиля, формируя на ней пленочное течение. Кроме того процессы отражения и выбивания капель с вогнутой поверхности также реализуются при условии образования устойчивой пленки на вогнутой поверхности. При начальных влажностях пара $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 5,4\%$, как отмечалось выше (см. Рисунок 4.10),

формирование водяной пленки на вогнутой поверхности не создает условий для интенсификации этих процессов.

При $y_0 = 8,4\%$ визуально наблюдается как сход язычков водяной пленки, так и срыв влаги со спинки профиля. При этом косвенные признаки говорят о том, что пику при $v = 0,45$ (капли, размеры которых больше 120 мкм) соответствует сход пленки с вогнутой поверхности, а пику $v = 0,55$ – со стороны спинки (капли, размеры которых приблизительно равны 80 мкм).

Концентрация наиболее крупных капель ($v = 0,4$) при $z = 0,05b$ практически одинакова для всех начальных влажностей пара. При этом их размеры превышают 120 мкм (см. Рисунок 4.11, которому соответствуют закрашенные маркеры). Для выявления физических аспектов проявления подобного поведения кривых распределений при $v = 0,4$ необходимо проведение дополнительных исследований, так как имеющиеся экспериментальные данные это сделать не позволяют.

По мере удаления от выходной кромки протекают процессы активного дробления капель в потоке – возникают дискретные частицы, размеры которых лежат в широком диапазоне диаметров. Это приводит к «размытию» рассматриваемых распределений ($z = 0,1b$). На режимах с $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 5,4\%$ спектр размеров частиц становится практически сплошным – пики проявляются очень слабо на фоне режима с начальной влажностью пара $y_0 = 8,4\%$. При этом концентрация частиц с коэффициентами скольжения $v = 0,55-0,75$ для этих режимов одинакова, а существенные отличия наблюдаются для капель крупных размеров (диаметры которых больше 20 мкм). Их концентрация для начальной влажности 5,4% практически в 2 раза выше, чем для режима с $y_0 = 3,4\%$. Это в первую очередь связано с наличием тонкой водяной пленки на вогнутой поверхности лопатки. При начальной влажности $y_0 = 8,4\%$ по мере удаления от выходной кромки на расстояние $z = 0,1b$ двухпиковая структура распределения трансформируется в однопиковую. Существенное различие в характере поведения рассматриваемой характеристики для этого режима относительно двух других

возможно связано с особенностями механизмов разрушения дискретных частиц (об этом будет показано ниже).

На расстоянии $z = 0,2b$ от выходной кромки, в области стабилизации дисперсного состава жидкой фазы режимам с начальными влажностями $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 8,4\%$ соответствуют два различных по своему характеру распределения. Для $y_0 = 3,4\%$ максимум расположен в области мелких капель (при $v = 0,85$), а для $y_0 = 8,4\%$ - в области крупнодисперсной влаги (при $v = 0,62$). В то же время режим с начальной влажностью $y_0 = 5,4\%$ занимает промежуточное положение – присутствует пик, как в зоне мелких частиц, так и в зоне крупных. Подобные различия так же могут быть связаны с различным проявлением механизмов дробления влаги в закрюночной области.

В зоне интенсивного уменьшения средних размеров капель ($\bar{z} = 0,05 - 0,08$) значение числа Вебера для капель составляет $We = 13$, а критическое значение - $We_{кр} = 12$. Условие $We > We_{кр}$ подтверждает предположение о том, что в закрюночной зоне имеют место процессы активного дробления влаги. На основе анализа чисел Вебера можно говорить о характере разрушения капель. В соответствии с [117] в данном случае может реализоваться 2 механизма дробления:

- Деформационное разрушение (см. Рисунок 4.13, а). Под действием силы аэродинамического сопротивления капля деформируется, при этом величина перепада давлений паровой фазы на центральную часть капли увеличивается. Силы поверхностного натяжения уменьшают толщину центральной части капли, а жидкость перемещается к ее краям. Это приводит к «разделению» капли на несколько крупных. Данный механизм разрушения не приводит к полному дроблению капли и служит лишь промежуточным этапом в формировании полидисперсной дискретной среды за выходной кромкой лопатки.

- «Мешковое» разрушение (см. Рисунок 4.13, б). Под действием внешних сил происходит деформация капли, вследствие чего формируется кольцо, из него потоком «выдувается» мешок, который разрушается основным

потоком. Процесс дробления сопровождается образованием мелкодисперсной влаги, чем может объясняться резкое уменьшение размеров в области выходной кромки сопловой лопатки ($\bar{z} = 0,05 - 0,08$ на Рисунке 4.11). После разрушения мешка, кольцо порождает поток крупных капель. Важно отметить, что после дробления капли подобным образом, могут интенсифицироваться процессы коагуляции дискретных частиц ввиду существенного различия в скоростных характеристиках образованной влаги и ее высокой концентрации.

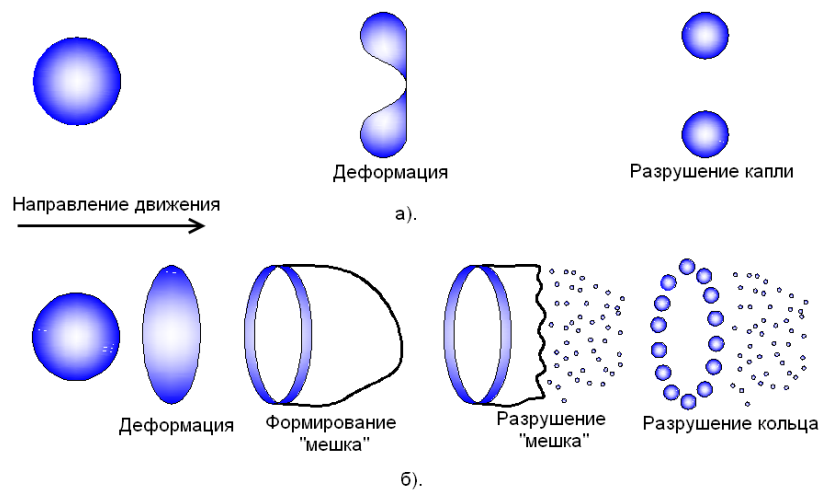


Рисунок 4.13.

Схемы разрушения капель. а: вибрационное; б: «мешковое»

Для получения достоверных данных о процессе изменения дисперсного состава влаги в кромочном следе необходимо учитывать также такие эффекты как коагуляция капель, а также конденсация пара на поверхности дискретной частицы, чего в данном анализе сделано не было.

На Рисунках 4.14 – 4.16 представлены распределения концентрации капель на траектории, исходящей из точки 3, в зависимости от их коэффициентов скольжения и относительного расстояния от выходной кромки. Данные характеристики довольно полно отражают характер изменения дисперсного состава влаги в кромочном следе по мере ее разгона основным потоком. На представленных картинах также синей линией отложены средние коэффициенты

скольжения для каждой точки на траектории (см. Рисунок 4.9), которым соответствуют осредненные по концентрации размеры частиц (см. Рисунок 4.11). Важно отметить несколько некорректный с математической точки зрения подход к визуализации полученных данных – производилось сглаживание сплошным сплайном [83] дискретных статистических данных, собранных в интервалах группирования экспериментальных результатов. Таким образом, в данном случае эти распределения представляют собой в первую очередь качественную картину изменения скоростных (а с ними и дисперсного состава влаги) характеристик потока дискретных частиц в закрочной области.

На основе представленных данных можно судить о влиянии начальной влажности пара перед исследуемой решеткой на процессы, протекающие в кромочном капельном следе. При $y_0 = 3,4\%$ вследствие активного дробления капель на расстоянии $z = 0,12b$ начинает проявляться дополнительный пик в области коэффициентов скольжения $v = 0,8$, что свидетельствует о присутствии в потоке мелких капель, размеры которых ниже 20 мкм. По мере дальнейшего удаления от выходной кромки их концентрация продолжает расти – происходит перераспределения концентраций частиц. С увеличением начальной влажности пик, соответствующий мелким каплям, начинает исчезать с распределений: если при $y_0 = 5,4\%$ существует зона проявления быстрых (по отношению к осредненным данным), а следовательно и мелких частиц, то при $y_0 = 8,4\%$ они практически не наблюдаются. Возможно, подобное поведение скоростных характеристик капель в потоке связано с влиянием их концентрации. При малых значениях начальной влажности доля крупных капель в кромочном капельном следе значительно меньше, чем при больших величинах y_0 . Как показано в [65], именно концентрация частиц больших диаметров в полидисперсном потоке является основным критерием интенсификации процессов коагуляции частиц. С ростом начальной влажности мелкие частицы, образованные в результате разрушения более крупных капель на раннем участке траектории впоследствии поглощаются медленной крупнодисперсной влагой. Как следствие, при переходе от $y_0 = 3,4\%$ к $y_0 = 8,4\%$ ярко выраженный пик концентрации при $v = 0,85$ исчезает

на расстоянии $z = 0,2b$. Кроме того, возможно, начинают также более активно проявляться процессы конденсации пара на поверхностях дискретных частиц.

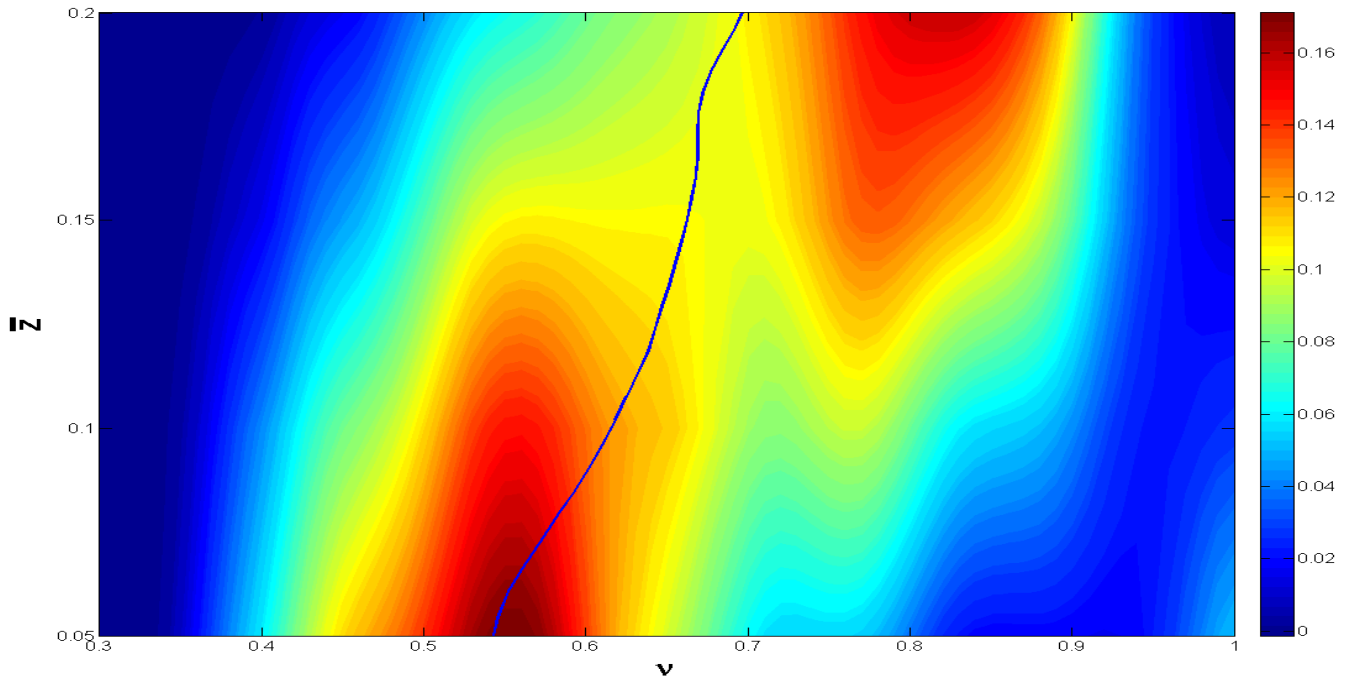


Рисунок 4.14.

Распределение концентрации капель вдоль траектории 3 при начальной влажности пара $y_0 = 3,4\%$

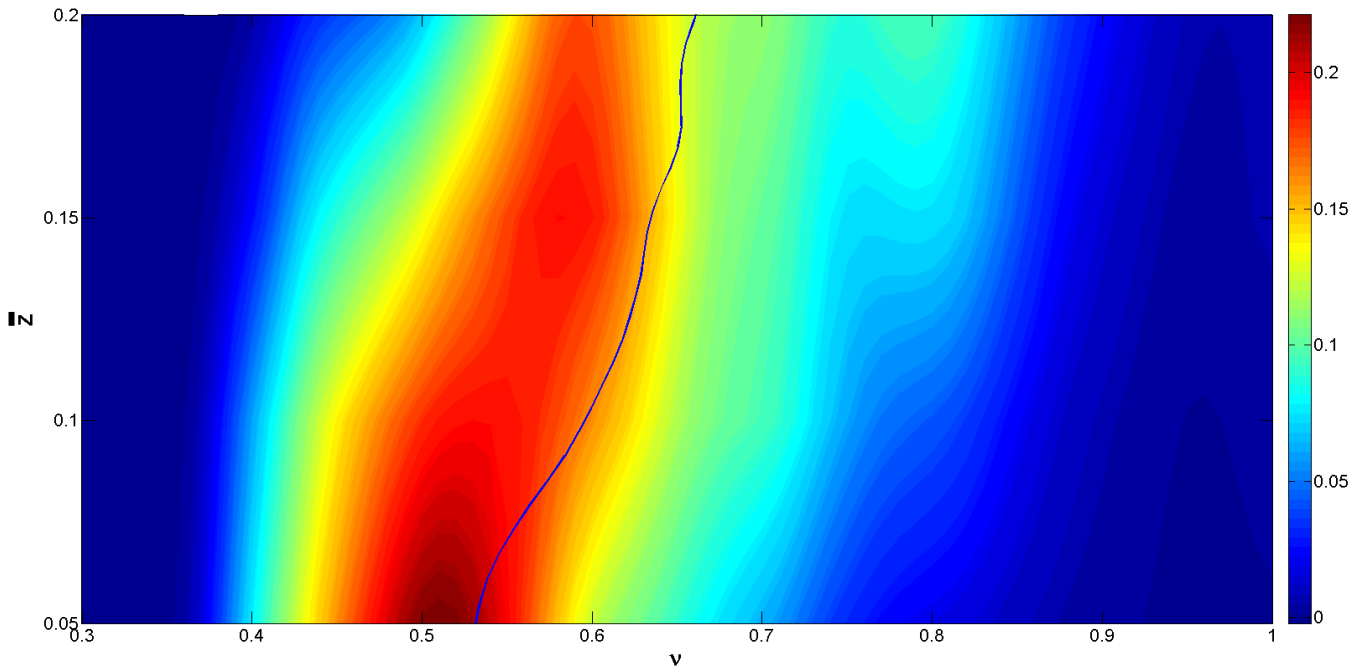


Рисунок 4.15.

Распределение концентрации капель вдоль траектории 3 при начальной влажности пара $y_0 = 5,4\%$

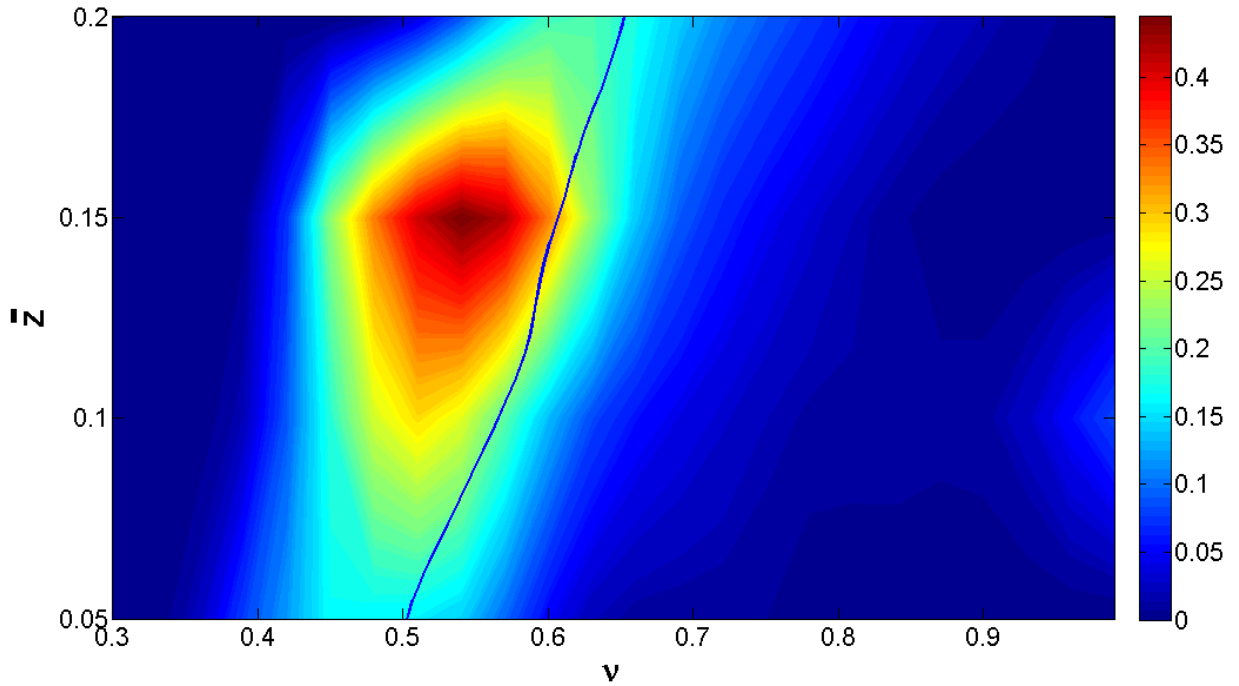


Рисунок 4.16.

Распределение концентрации капель вдоль траектории при начальной влажности пара $y_0 = 8,4\%$

Рассмотренные две траектории капель (исходящие из точек 1 и 3) являются характерными для течения полидисперсной двухфазной среды в рассматриваемой сопловой решетке. Анализ перемещения капель вдоль остальных траекторий показал, что на них параметры влаги занимают некоторое промежуточное положение по отношению к описанным выше данным. Это в первую очередь связано с расширением кромочного капельного следа по мере удаления от выходной кромки лопатки (см. Рисунок 4.1). На Рисунках 4.17 и 4.18 представлены распределения коэффициентов скольжения и разницы углов для траекторий 2 и 4, а на Рисунках 4.19 и 4.20 отображено изменение средних по концентрации диаметров капель. Значения размеров частиц дискретной фазы вдоль траектории 4 оказались существенно разбросаны. Для получения корректной картины изменения средних диаметров капель вдоль этой траектории, необходимо увеличить количество мгновенных полей скоростей, определяемых с помощью PIV алгоритма.

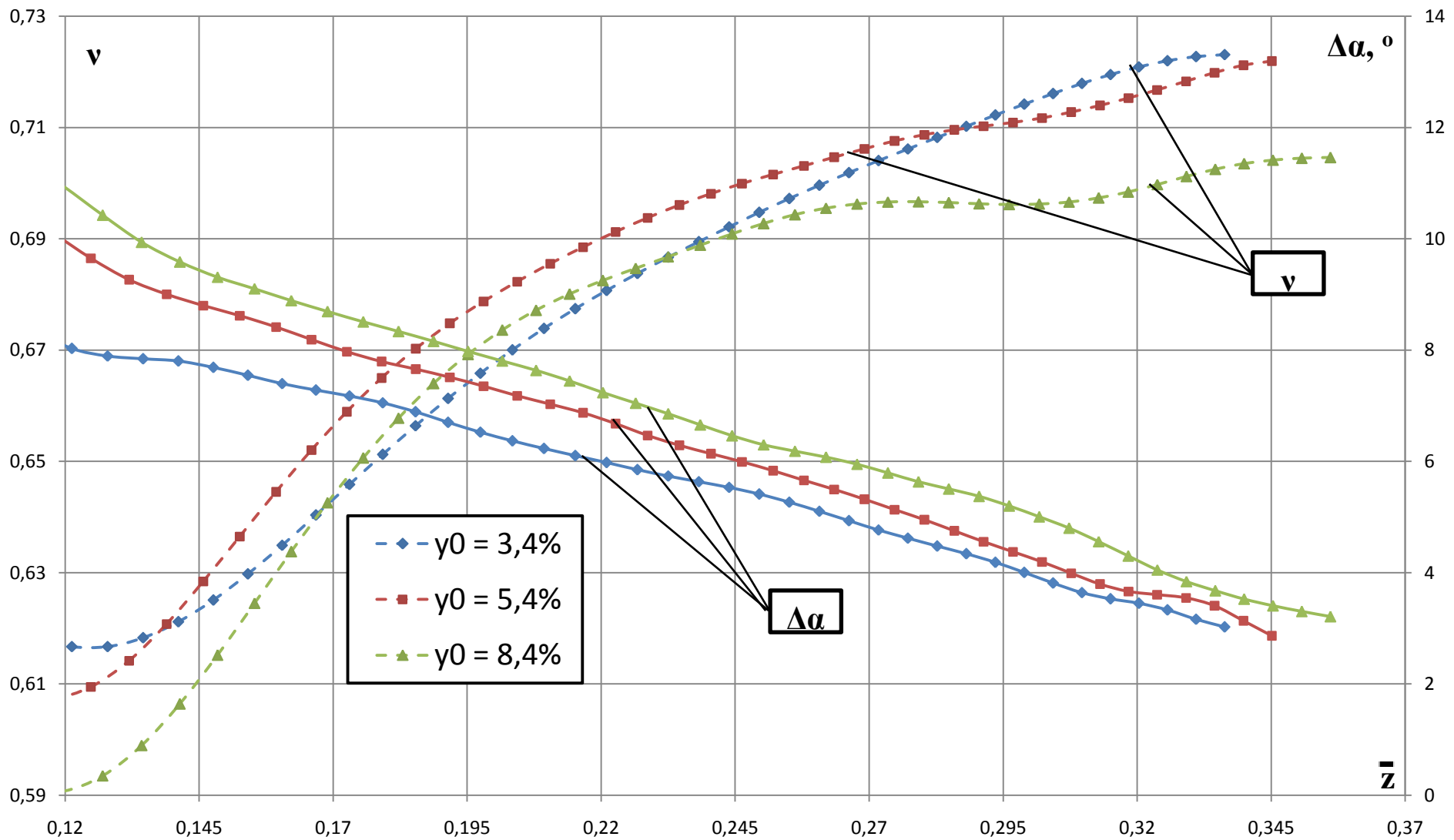


Рисунок 4.17.

Распределение коэффициентов скольжения и углов отклонения капель вдоль траектории, исходящей из точки 2

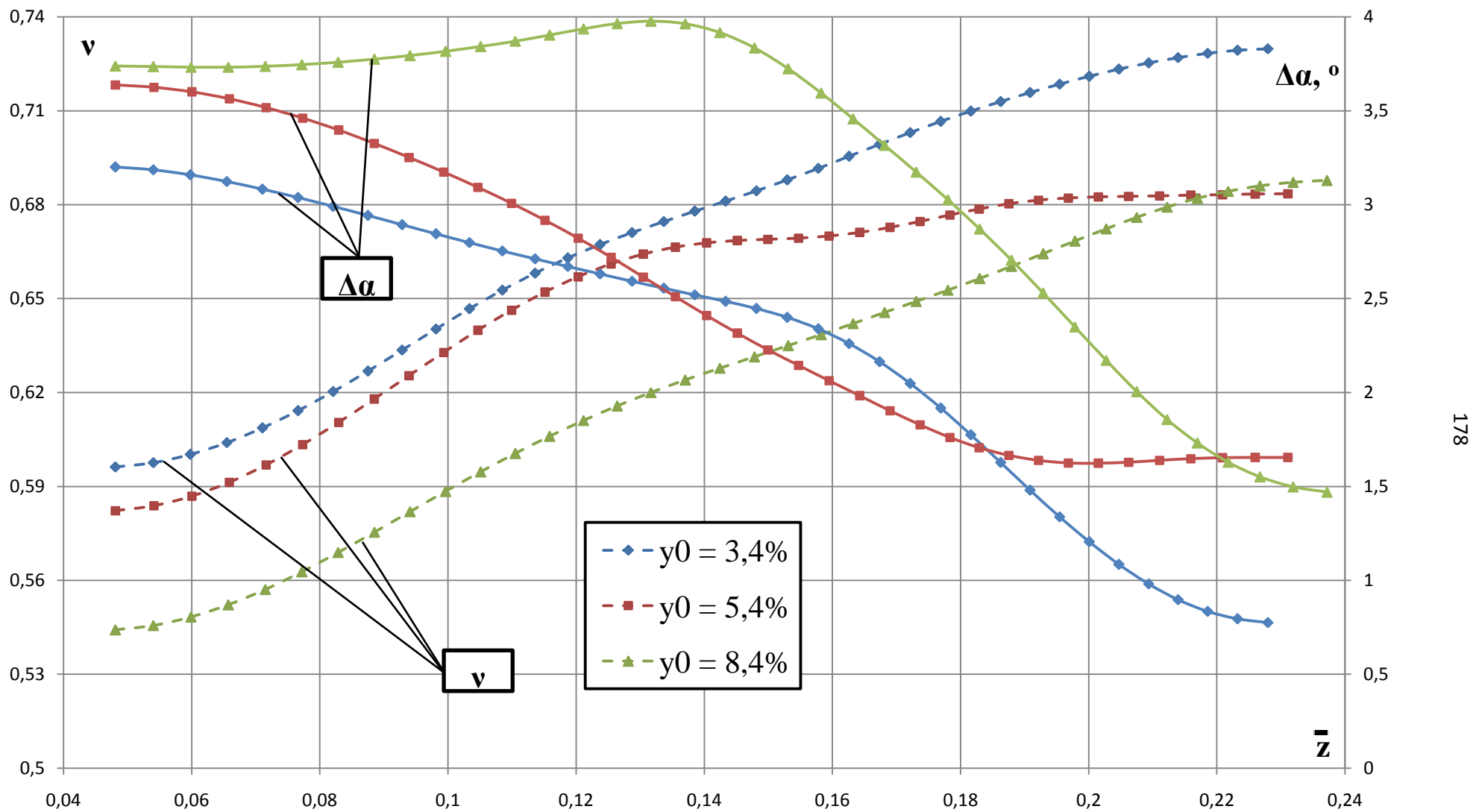


Рисунок 4.18.

Распределение коэффициентов скольжения и углов отклонения капле вдоль траектории, исходящей из точки 4

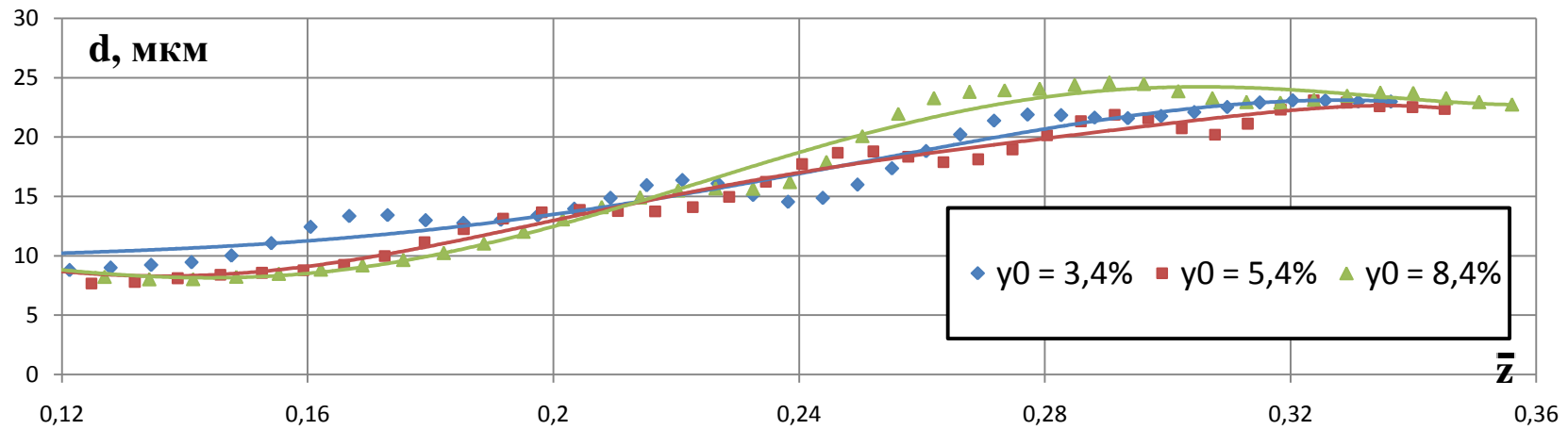


Рисунок 4.19.

Распределение средних размеров капель вдоль траектории, исходящей из точки 2

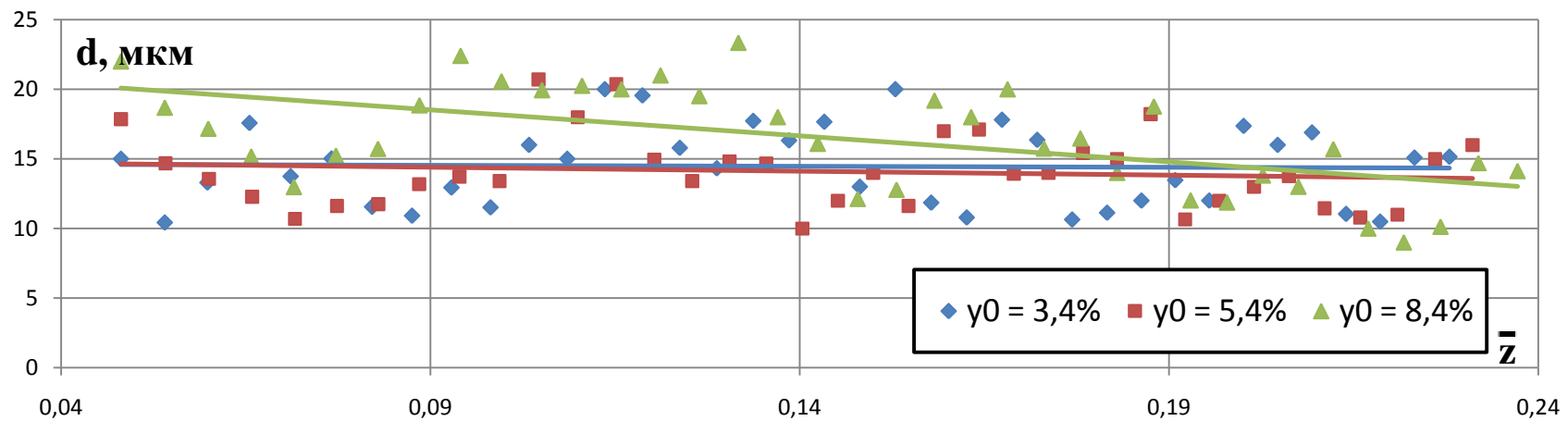


Рисунок 4.20.

Распределение средних размеров капель вдоль траектории, исходящей из точки 4

Тенденция роста коэффициентов скольжения и выравнивания направления движения капель, выявленная ранее вдоль траекторий 1 и 3, сохраняется и на двух рассматриваемых траекториях. Стоит отметить, существенное рассогласование направления движения капель по отношению к основному потоку вдоль траектории, исходящей из точки 2 (см. Рисунок 4.17). Величина отклонения варьируется в пределах $8^\circ - 11^\circ$ на начальном участке движения, что почти в 2 раза ниже, чем вдоль траектории 1 (см. Рисунок 4.6).

Таким образом, анализ распределений параметров крупных частиц вдоль их траекторий показал, что максимальное рассогласование в углах выхода частиц наблюдается в области за сопловой решеткой, расположенной со стороны спинки лопатки.

Средние размеры капель вдоль траектории 2 постоянно растут от 10 до 20 - 25 мкм по мере удаления от выходной кромки лопатки (см. Рисунок 4.19), что связано с расширением кромочного капельного следа. На границе кромочного капельного следа со стороны вогнутой поверхности (траектория 4), если судить по осредненным линиям, представленным на Рисунке 4.20, при начальных влажностях пара 3,4% и 5,4% средние размеры капель совпадают и составляют порядка 14,5 мкм. При $y_0 = 8,4\%$ на начальном участке траектории диаметры дискретных частиц оказались значительно выше и приблизительно равны 20 мкм. На данном режиме наблюдается заметное уменьшение коэффициентов скольжения с ростом начальной влажности (см. Рисунок 4.3 область $\bar{x} = 0,75 - 0,9$) в рассматриваемой зоне, что по всей видимости связано с расширением кромочного капельного. Помимо этого возможна интенсификация дополнительного источника крупнодисперсной влаги, который связан с началом интенсивного уноса жидкости с поверхности пленки на вогнутой стороне лопатки за счет механизмов отражения и выбивания частиц жидкой фазы с границы бинарного подслоя.

Рассмотрение траектории капель, исходящих из точки 5 показало, что набранного количества кадров оказалось недостаточным для получения

достоверных статистических данных о характере движения крупных капель в этой области. Можно сказать, что на участке траектории, исходящей из точки 5, крупных капель выявлено не было.

На Рисунке 4.21, в качестве обобщающих данных, представлены средние диаметры капель по количеству, определенные в точках рассмотренных траекторий, расположенных на расстоянии $0,1b$ (Рисунок 4.20, а) и $0,2b$ (Рисунок 4.20, б) от выходной кромки лопатки.

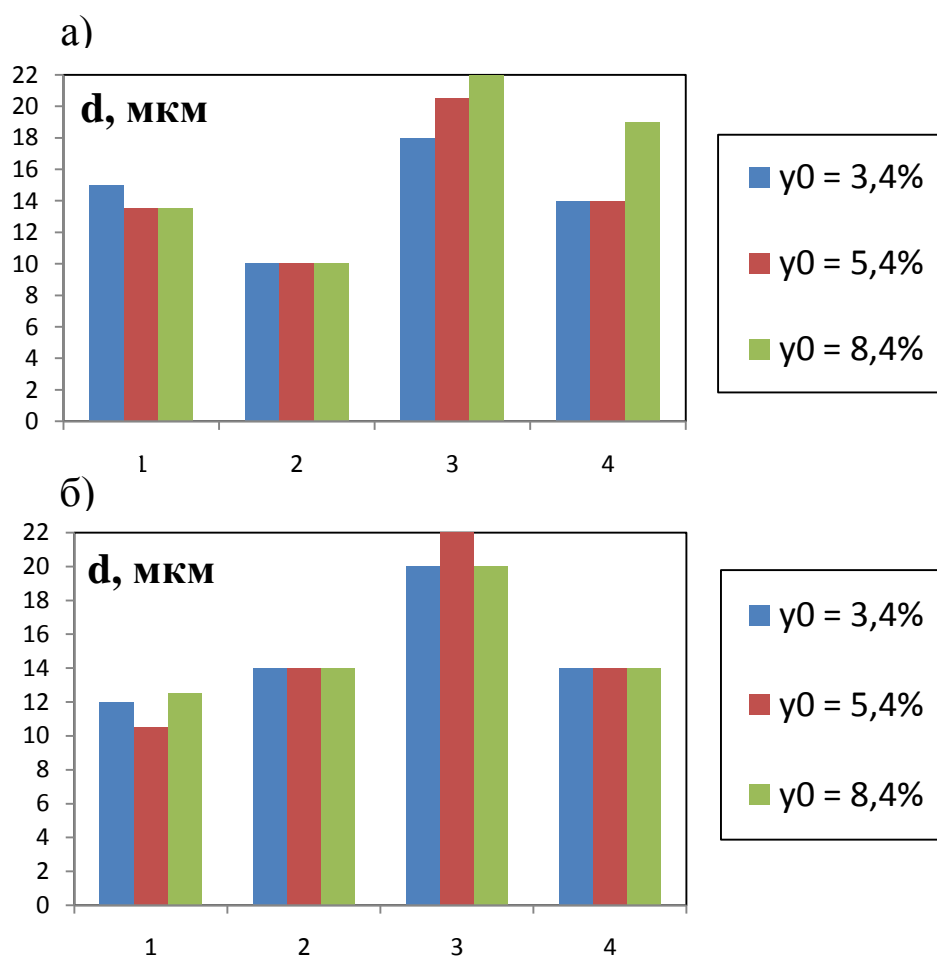


Рисунок 4.21.

Средние диаметры капель на рассмотренных траекториях на расстоянии $0,1b$ (а) и $0,2b$ (б) от выходной кромки лопатки

Экспериментальные данные, которые были описаны в данном разделе, показали, что за решеткой четко наблюдаются 2 источника крупнодисперсной влаги. Кроме того при величине $\gamma_0 = 8,4\%$ интенсифицируются процессы

выбивания и отражения частиц жидкости с вогнутой поверхности профиля. Для каждой из характерных траекторий капель определены основные скоростные характеристики, а также вычислены средние размеры крупных капель,двигающихся вдоль них.

4.3. Влияние $\bar{\rho}$ на характеристики капель за сопловой решеткой

Влияние критерия подобия $\bar{\rho}$ на характеристики капель за сопловой решеткой рассматривалось при 3 значениях $\bar{\rho}$: 3790; 2581; 1994, характерных для режимов течения в последних ступенях паровых турбин [22]. Изменение этого параметра в существенной мере влияет на скоростные характеристики жидкой фазы в потоке [81]. Как отмечалось выше, в данном случае не поддерживался постоянным другой критерий подобия – число Рейнольдса. В [31] указывается на взаимную зависимость этих параметров между собой. При этом значительное влияние на изменение характеристик жидкой фазы имеет величина $\bar{\rho}$.

Изменение $\bar{\rho}$ происходит в первую очередь за счет изменения плотности несущей среды (пара), так как плотность жидкой частицы с изменением давления полного торможения практически не меняется. Из уравнения (3.2) видно, что перестроение характеристик влаги за решеткой при переменном значении $\bar{\rho}$ вызвано изменением интенсивности сил, действующих на капли со стороны основного потока. Экспериментальные исследования проводились в условиях автомодельности числа Re , это минимизирует влияние на скоростные характеристики капель таких явлений как изменение режима течения в пограничном слое, изменение характера взаимодействия пленки с парокпельным слоем и каплями, изменение интенсивности турбулентности. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два значения начальной влажности пара перед исследуемой решеткой: $y_0 = 3,4\%$ и $y_0 = 8,4\%$.

На Рисунках 4.22 и 4.23 представлены распределения средних коэффициентов скольжения при различных значениях $\bar{\rho}$. В первую очередь необходимо отметить, что область существенно низких коэффициентов скольжения в правом краю Рисунков для режимов с $\bar{\rho} = 1994$ связана не с

режимными параметрами, а с невозможностью системой «ПОЛИС» получить сфокусированное изображение на мгновенных снимках, что вызвано формированием на оптическом стекле развитой водяной пленки. Как видно из полученных данных, изменение относительной плотности приводит к существенным перестроениям характеристик капель за сопловой решеткой.

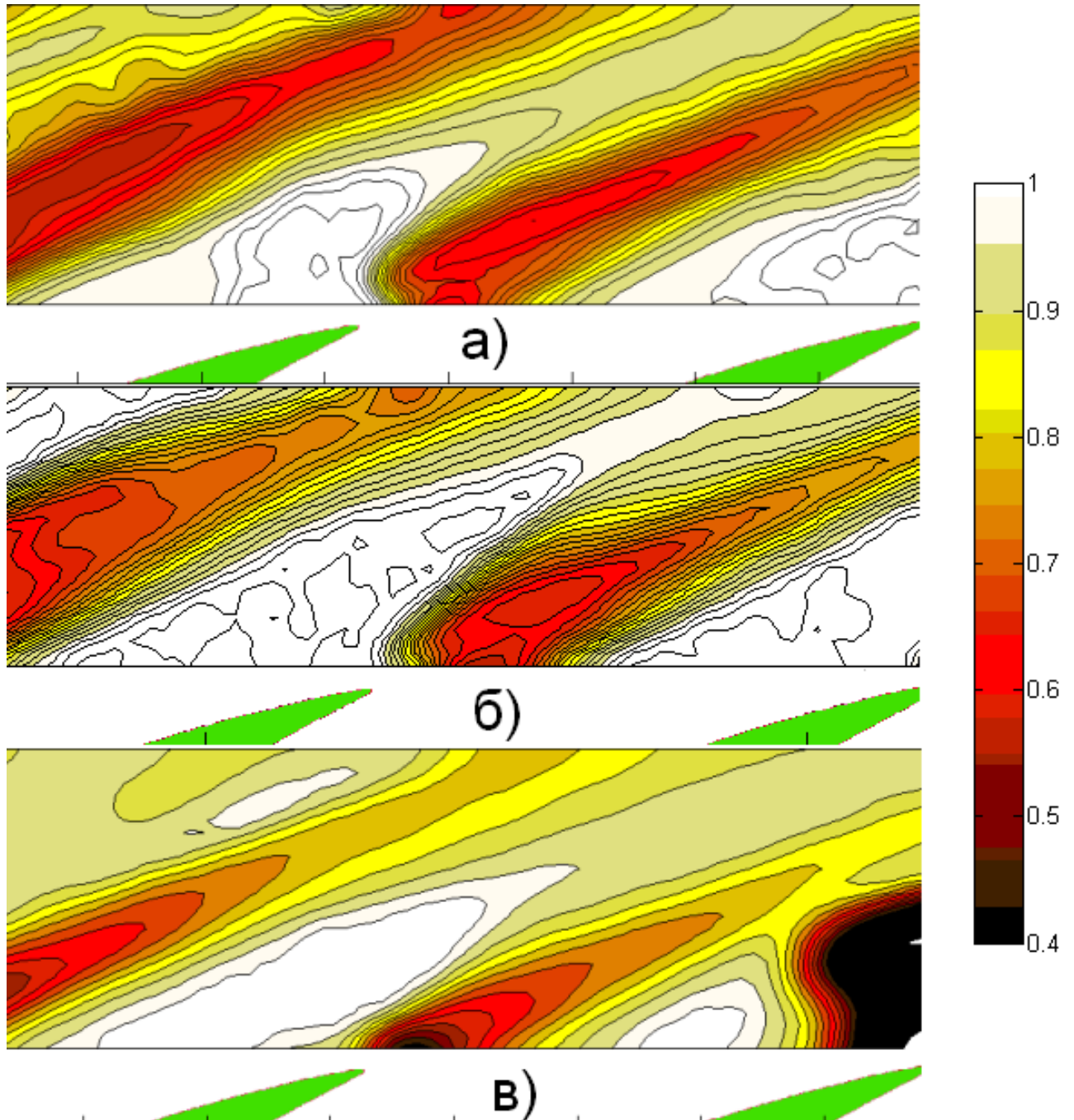


Рисунок 4.22.

Распределение средних коэффициентов скольжения за сопловой решеткой при начальной влажности пара $y_0 = 3,4\%$. а: $\bar{\rho} = 3790$; б: $\bar{\rho} = 2581$; в: $\bar{\rho} = 1994$

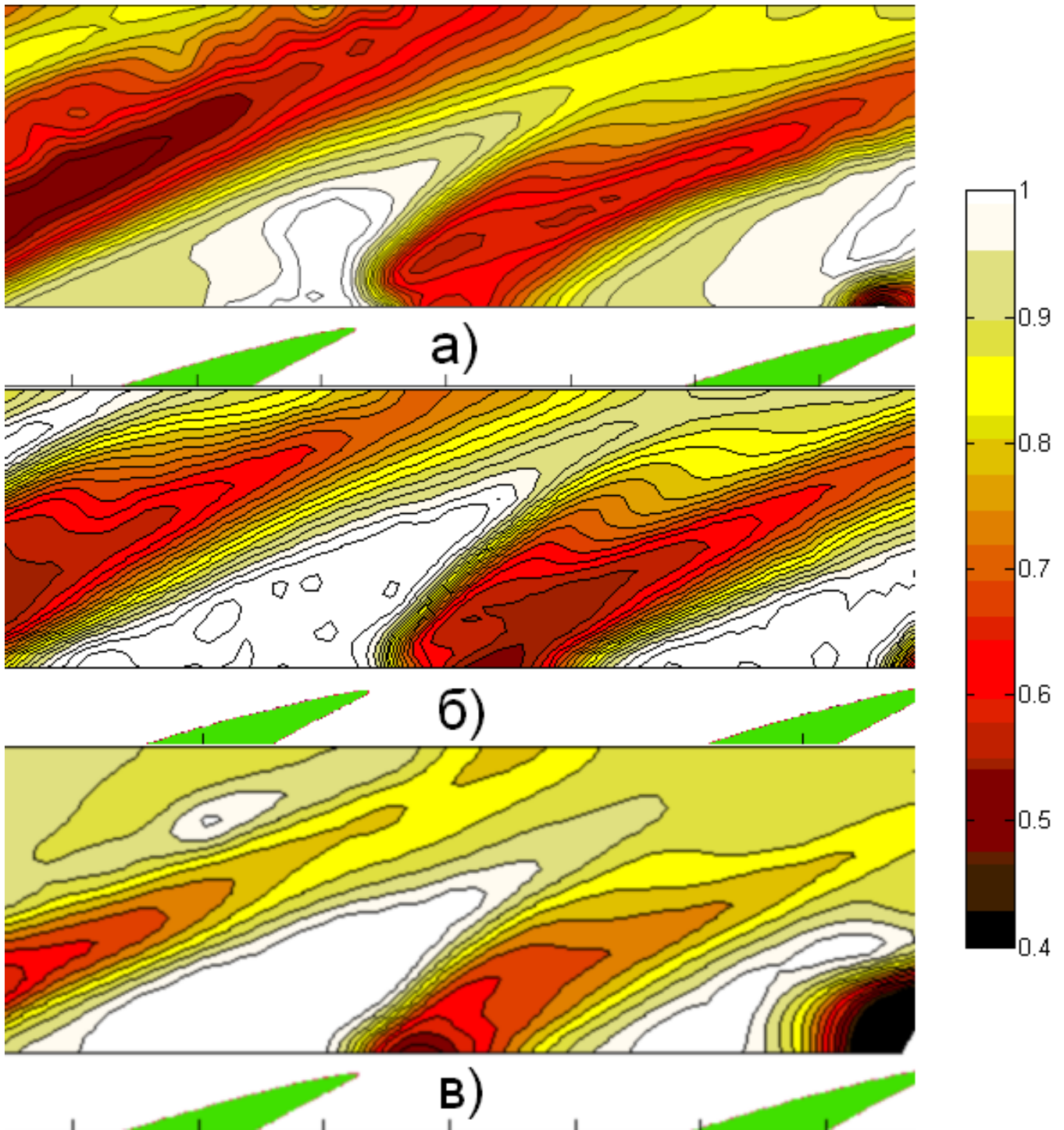


Рисунок 4.23.

Распределение средних коэффициентов скольжения за сопловой решеткой при начальной влажности пара $y_0 = 8,4\%$. а: $\bar{\rho} = 3790$; б: $\bar{\rho} = 2581$; в: $\bar{\rho} = 1994$

Коэффициенты скольжения частиц непосредственно за выходной кромкой с уменьшением $\bar{\rho}$ уменьшаются. Этот эффект связан с тем, что массовый расход жидкой фазы при малых $\bar{\rho}$ выше, так как для достижения необходимого режима

производилось регулирование величины давления полного торможения перед решеткой, а следовательно и расхода двухфазной среды (чем меньше $\bar{\rho}$, тем выше p_0). Это приводит к формированию развитой водяной пленки на поверхности лопатки при более низкой влажности. Ее срыв с выходной кромки влечет за собой образование капель, размеры которых больше, чем на режимах с повышенными значениями $\bar{\rho}$. Их инертность приводит к тому, что коэффициенты скольжения в этой области уменьшаются с уменьшением $\bar{\rho}$.

Непосредственно внутри кромочного капельного следа ускорение частиц дискретной фазы при малых $\bar{\rho}$ происходит значительно более интенсивно, чем при больших значениях $\bar{\rho}$. Особенно явно это наблюдается при сравнении режимов с $\bar{\rho} = 2581$ и $\bar{\rho} = 1994$. Увеличение плотности пара (уменьшение $\bar{\rho}$) приводит к росту аэродинамического сопротивления капель, что способствует более интенсивному воздействию на них со стороны основного потока.

На представленных Рисунках довольно четко просматривается поток первичной влаги, которая, не взаимодействуя со стенками канала, пересекает кромочный след и движется со стороны спинки профиля (подробно об этом явлении написано выше). Уменьшение $\bar{\rho}$ приводит к тому, что данные капли начинают слабее проявляться на распределениях коэффициентов скольжения. При начальной влажности $y_0 = 3,4\%$ и $\bar{\rho} = 1994$ (Рисунок 4.22, в) они отсутствуют, в то время как на режимах с $\bar{\rho} = 3790$ (Рисунок 4.21, а), $\bar{\rho} = 2581$ (Рисунок 4.22, б) четко проявляется область низких коэффициентов скольжения со стороны спинки лопатки. При начальной влажности $y_0 = 8,4\%$ поток капель со стороны спинки профиля проявляется и на режиме с $\bar{\rho} = 1994$ (Рисунок 4.23, в), однако зона его распространения значительно меньше, чем при $\bar{\rho} = 3790$ (Рисунок 4.23, а) и $\bar{\rho} = 2581$ (Рисунок 4.22, б). Повышение плотности несущей среды, как уже отмечалось выше, увеличивает силу аэродинамического воздействия потока на частицы жидкой фазы. При этом траектории движения влаги сближаются с линиями тока основного потока и, как следствие, угол выхода потока первичных

капель, не взаимодействующих со стенками межлопаточного канала, уменьшается.

Данное предположение подтверждается рассмотрением траекторий движения капель за сопловой решеткой (см. Рисунки 4.24 и 4.25). При начальной влажности $y_0 = 3,4\%$ капли со стороны спинки профиля, исходящие из точки 1 на Рисунке 4.24, при величине $\bar{\rho} = 1994$ (при высоком давлении полного торможения перед исследуемым каналом) движутся под заметно меньшими углами, чем при $\bar{\rho} = 3790$ и $\bar{\rho} = 2581$. В данном случае траектории частиц жидкости (при $\bar{\rho} = 1994$) в этой области близки к линиям тока паровой фазы, что подтверждает отсутствие крупнодисперсной влаги. При этом, как видно из Рисунка 4.24, характер движения капель при $\bar{\rho} = 3790$ и $\bar{\rho} = 2581$, начинающих движение из точки 1, совпадает.

Повышение начальной влажности пара до $8,4\%$, как уже отмечалось ранее, приводит к появлению первичной крупной влаги со стороны спинки профиля при $\bar{\rho} = 1994$, что проявляется ростом углов выхода частиц жидкой фазы, движущихся в этой области (см. точка 1 Рисунок 4.25).

Рост начальной влажности способствует увеличению рассогласования углов выхода капель в кромочном следе при различных значениях параметра $\bar{\rho}$ (см. Рисунки 4.24, 4.25 траектория 3). Если при $y_0 = 3,4\%$ расслоение траекторий из этой точки было незначительное, то переход на $y_0 = 8,4\%$ приводит к довольно четко наблюдаемой тенденции уменьшения углов выхода капель с уменьшением $\bar{\rho}$.

Существенное рассогласование в направлении движения капель, исходящих из точки 2, с изменением параметра $\bar{\rho}$ наблюдается при всех рассматриваемых начальных влажностях пара. При сопоставлении картин перемещения частиц дискретной фазы при $y_0 = 8,4\%$ и $y_0 = 3,4\%$ определенной закономерности изменения углов выхода вдоль этой траектории выявлено не было.

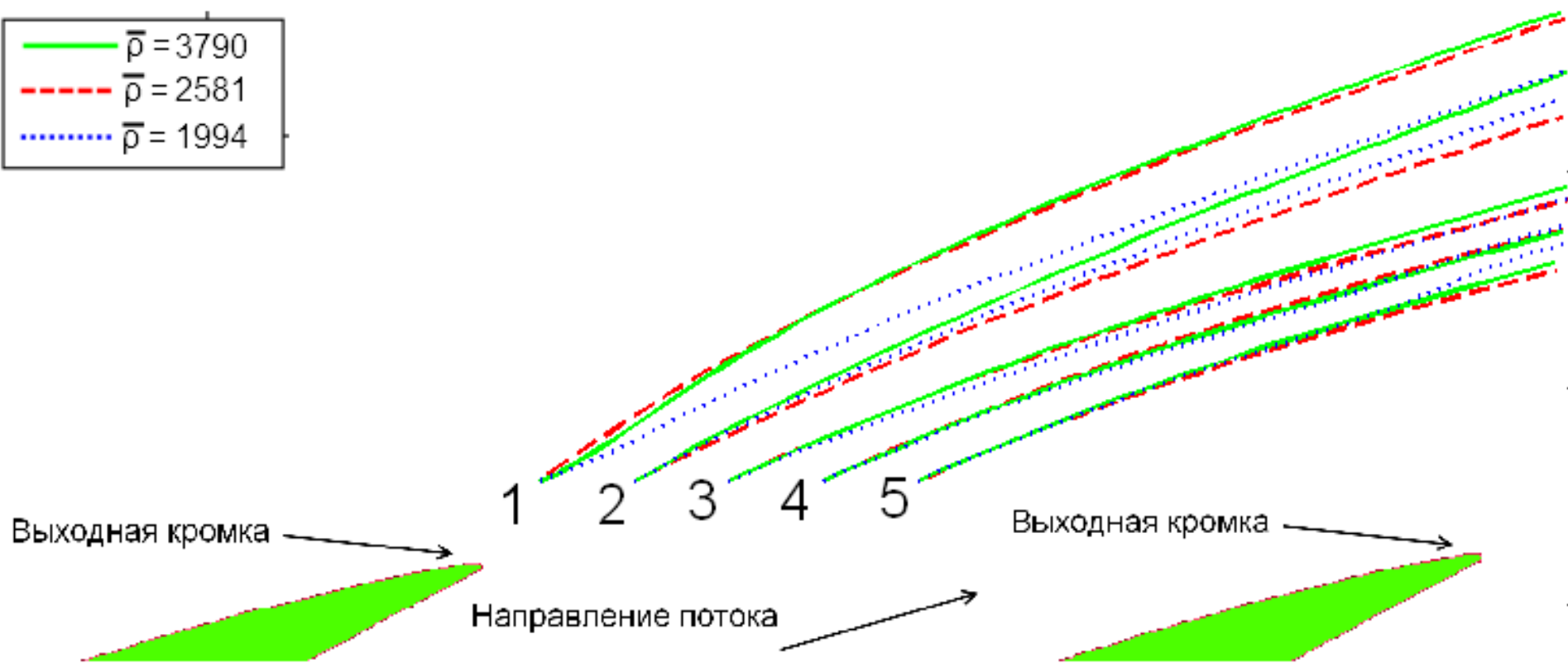
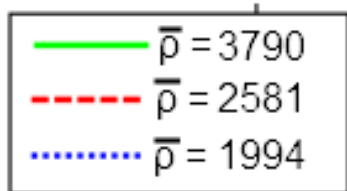


Рисунок 4.24.

Траектории движения капель за решеткой при начальной влажности $y_0 = 3,4\%$

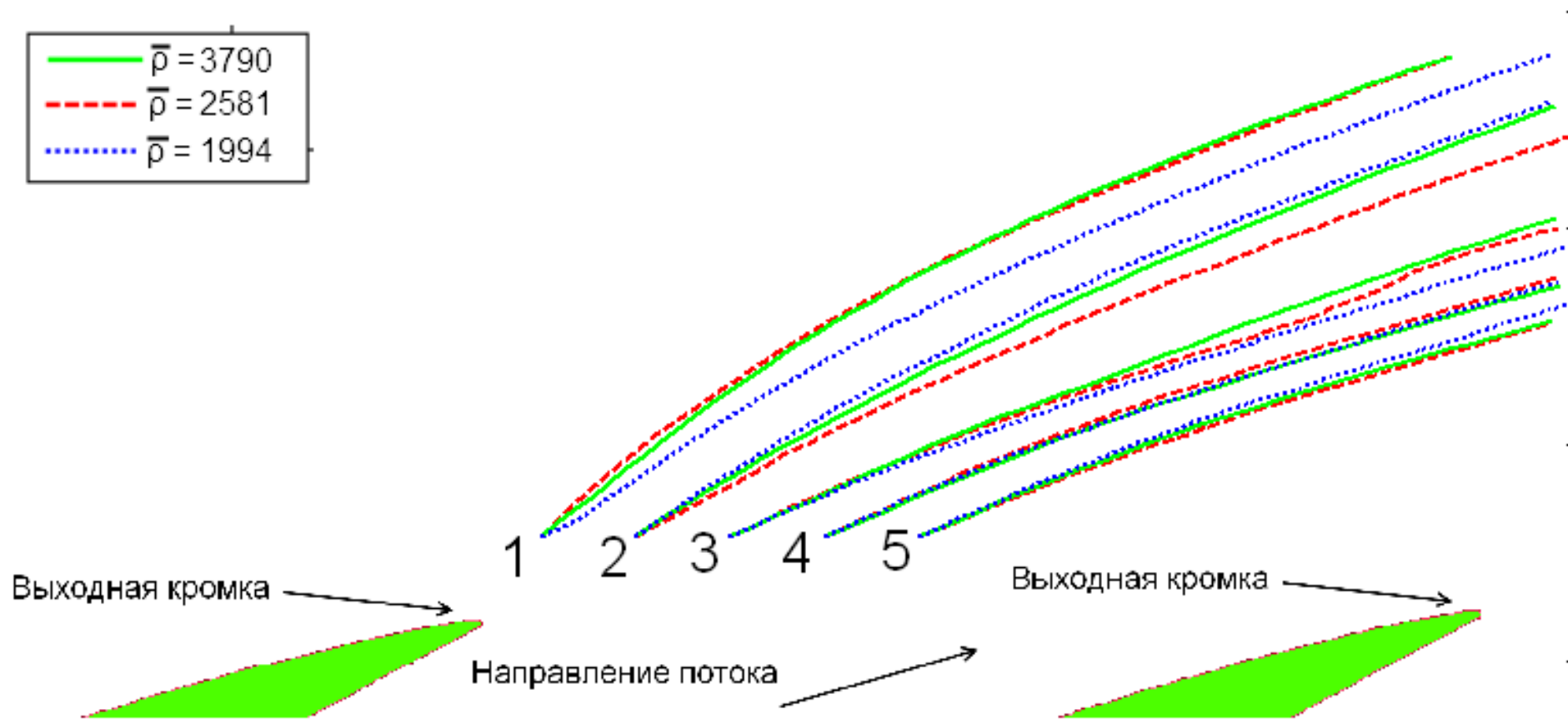


Рисунок 4.25.

Траектории движения капель за решеткой при начальной влажности $y_0 = 8,4\%$

На Рисунках 4.26 и 4.27 представлены распределения коэффициентов скольжения и размеров крупных капель вдоль траектории, расположенной в кромочном капельном следе (траектория 3 на Рисунках 4.24 и 4.25). При формировании этих данных использовался аналогичный метод отсеивания частиц жидкой фазы по коэффициентам скольжения как и в предыдущем разделе. При начальной влажности пара $y_0 = 3,4\%$ (см. Рисунок 4.26) уменьшение $\bar{\rho}$ приводит к уменьшению коэффициентов скольжения непосредственно вблизи выходной кромки ($z = 0,05b$). При этом, как видно из графика, если при максимальном значении $\bar{\rho} = 3790$ величина коэффициента скольжения практически не изменяется по мере удаления частиц жидкой фазы от сопловой решетки, то при $\bar{\rho} = 2581$ и $\bar{\rho} = 1994$ происходит активное ускорение частиц. Чем больше плотность пара, тем выше градиент скорости капель на начальном участке движения ($z = 0,05b - 0,11b$). Как следствие, в результате активного механического взаимодействия фаз, вызывающего дробление дискретных частиц, на режимах с $\bar{\rho} = 2581$ и $\bar{\rho} = 1994$ средние по концентрации размеры капель в области установившегося дисперсного состава ($z = 0,11b - 0,19b$) в два раза меньше, чем при $\bar{\rho} = 3790$. Таким образом, представленные результаты довольно отчетливо отражают степень влияния плотности паровой фазы на характеристики дискретной среды, движущейся за счет основного потока.

С ростом начальной влажности до $y_0 = 8,4\%$ (см. Рисунок 4.27) характер распределения параметров жидкой фазы сохраняется. Однако, если при $y_0 = 3,4\%$ для режимов с $\bar{\rho} = 2581$ и $\bar{\rho} = 1994$ на участке $z = 0,13b - 0,25b$ (см. Рисунок 4.26) коэффициенты скольжения капель в кромочном следе совпадают, то повышение начальной влажности приводит к существенному уменьшению v для $\bar{\rho} = 2581$, в то время как скоростные характеристики при $\bar{\rho} = 1994$ остаются неизменными.

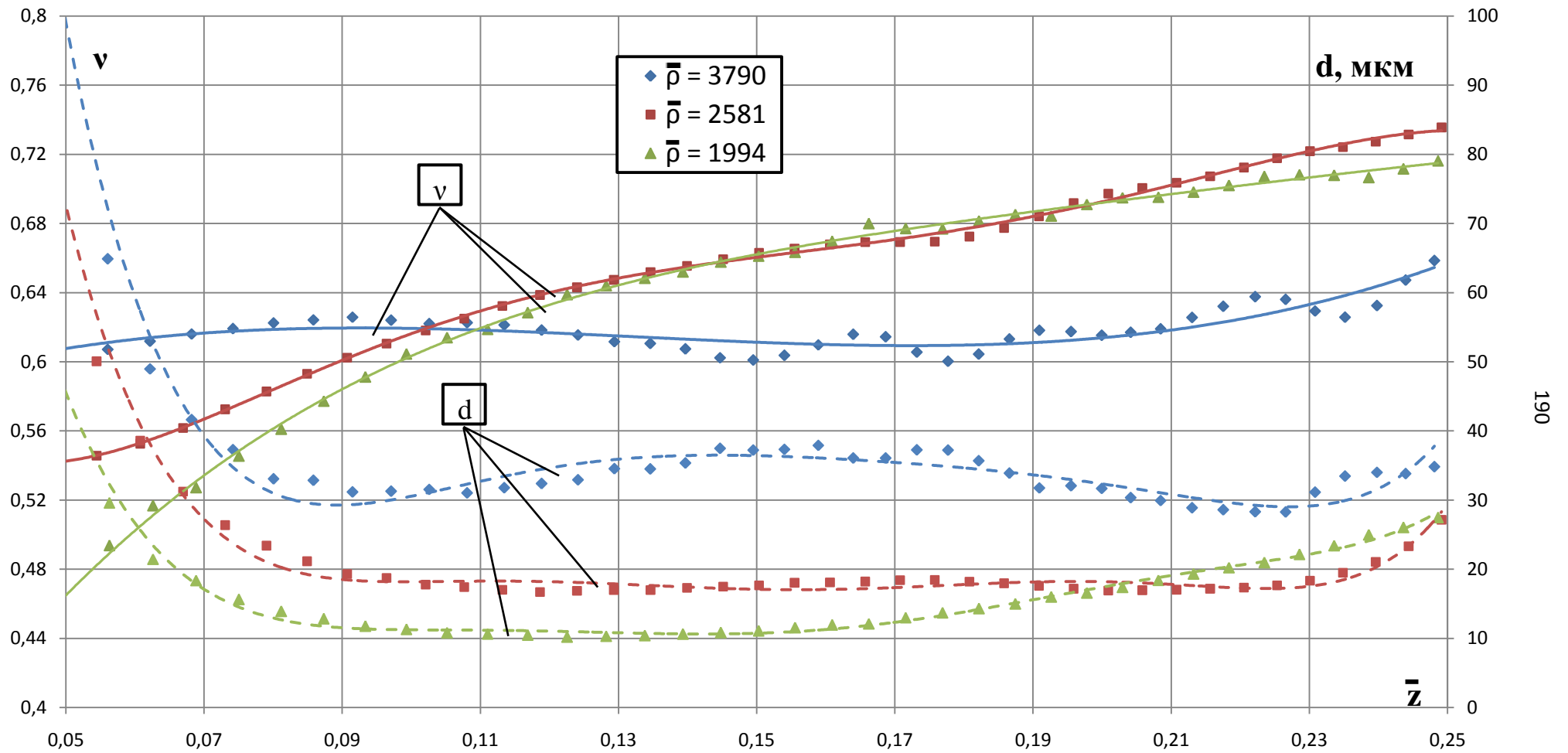


Рисунок 4.26.

Распределение коэффициентов скольжения и размеров капель вдоль траектории, расположенной в кромочном капельном следе при $y_0 = 3,4\%$

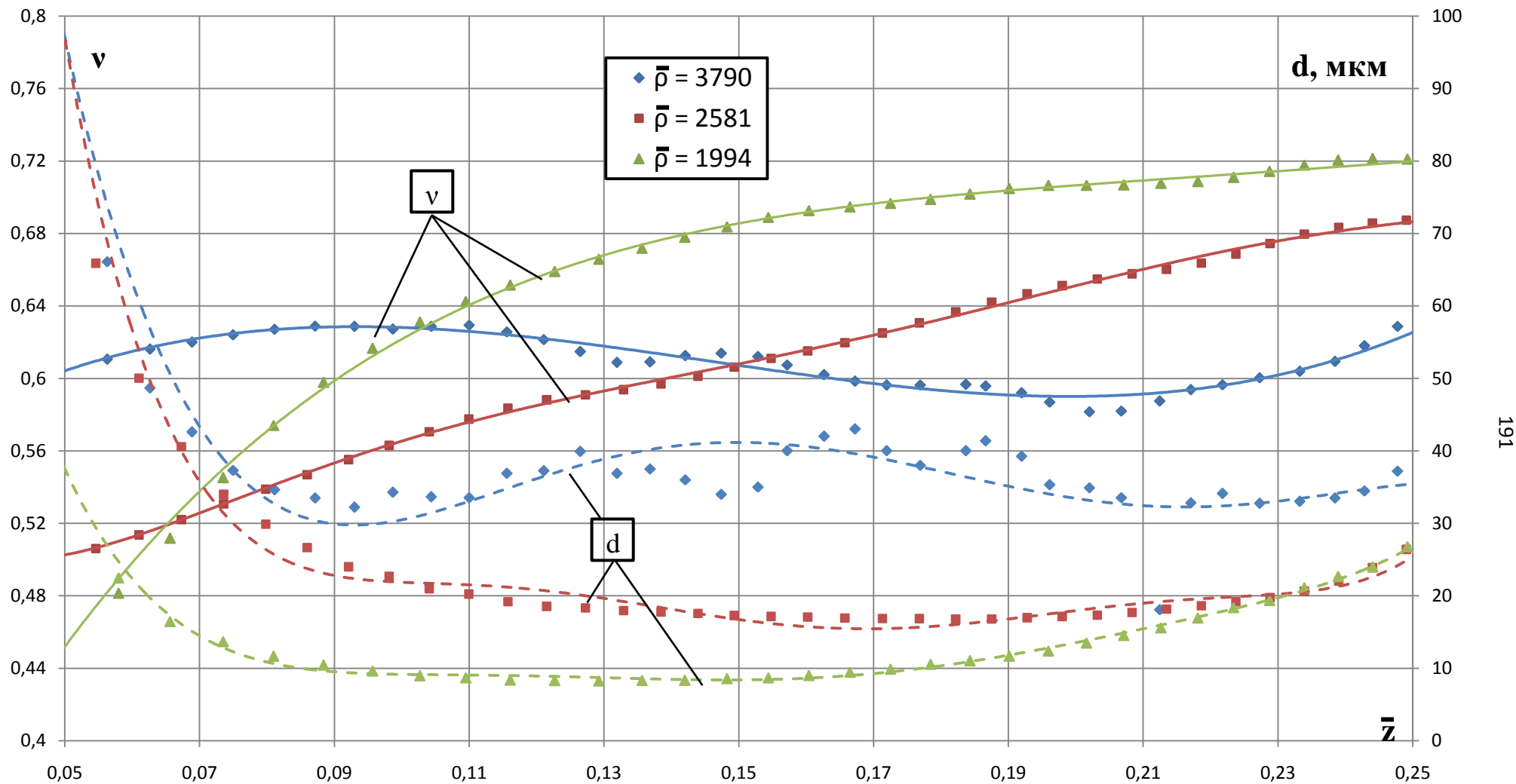


Рисунок 4.27.

Распределение коэффициентов скольжения и размеров капель вдоль траектории, расположенной в кромочном капельном следе при $y_0 = 8,4\%$

4.4. Обобщенные характеристики крупнодисперсной влаги за сопловой решеткой

На основе серии проведенных экспериментальных исследований, были получены обобщенные характеристики движения крупнодисперсной влаги в кромочном следе для исследуемой решетки (см. Рисунки 4.28-4.31). Здесь величина $\bar{\gamma}$ – безразмерный средний диаметр, определяемый по следующей формуле:

$$\bar{\gamma} = \frac{d}{d_0}, \quad (4.7)$$

где d_0 – средний размер крупнодисперсной влаги, формируемой пародутьевыми форсунками перед исследуемым объектом. Эти данные, в совокупности с траекториями движения характерных потоков крупных частиц жидкой фазы (см. Рисунки 4.24, 4.25), позволяют довольно подробно описать процессы формирования и движения крупнодисперсной влаги в межосевом зазоре ступени.

Представленные характеристики имеют важное практическое применение на этапе проектирования проточных частей последних ступеней ЦНД конденсационных турбин и турбин АЭС. Их использование позволяет:

1. Получить входные треугольники скоростей для крупных капель, тем самым определить зоны активного эрозионного износа рабочих лопаток.
2. Выбрать значение межосевого зазора ступени с точки зрения скоростей, углов движения и размеров капель.
3. Выбрать на этапе проектирования геометрические характеристики и режимные параметры систем уменьшения концентрации эрозионно-опасной влаги в потоке: сепарации пленки, вдува греющего пара.
4. Полученные параметры движения крупнодисперсной влаги могут быть использованы как исходные данные для прогнозирования эрозионного износа рабочих лопаток [118]: определения степени разрушения материала в зависимости от времени работы машины, напряжения в металле при соударении капли с поверхностью лопатки и так далее.

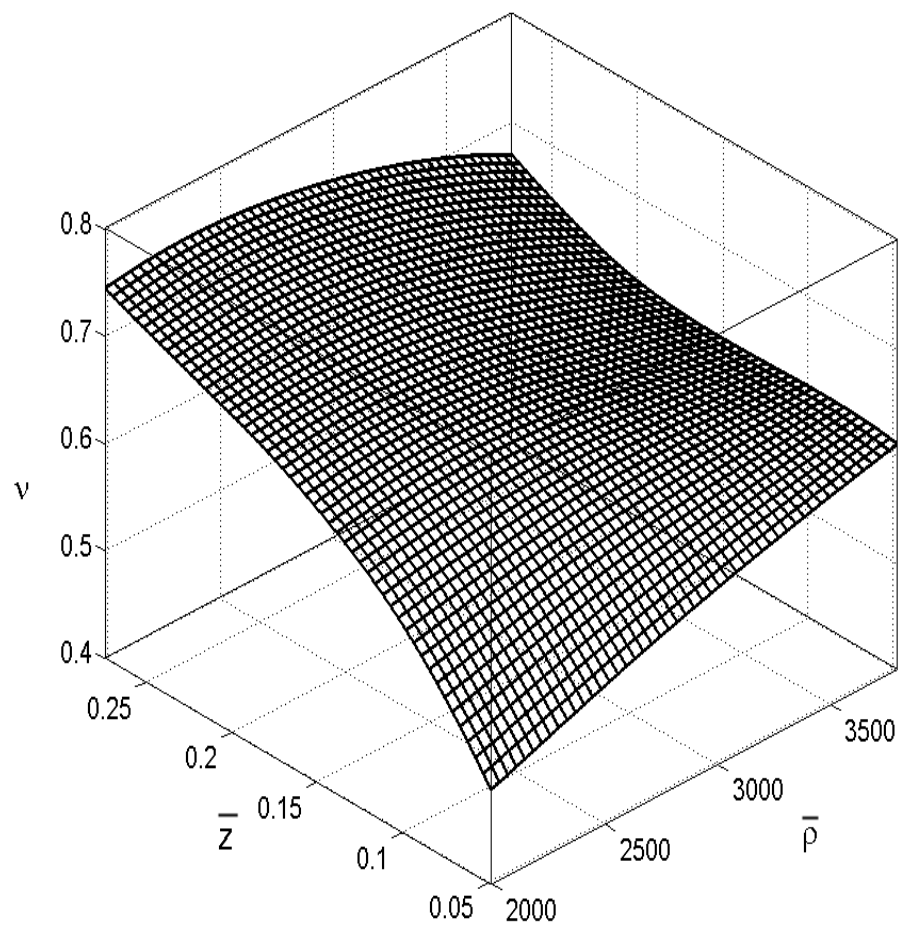


Рисунок 4.28.

Распределение коэффициентов скольжения в кромочном капельном следе в зависимости от параметра $\bar{\rho}$ и расстояния от выходной кромки \bar{z} при начальной влажности $y_0=3,4\%$

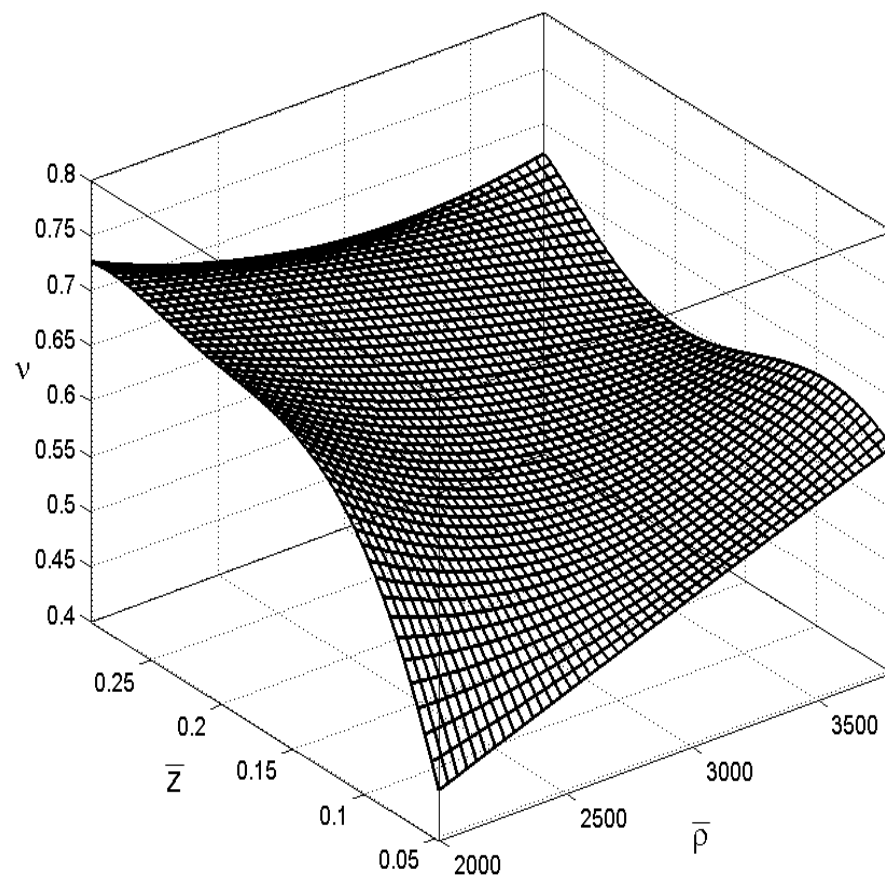


Рисунок 4.29.

Распределение коэффициентов скольжения в кромочном капельном следе в зависимости от параметра $\bar{\rho}$ и расстояния от выходной кромки \bar{z} при начальной влажности $y_0=8,4\%$

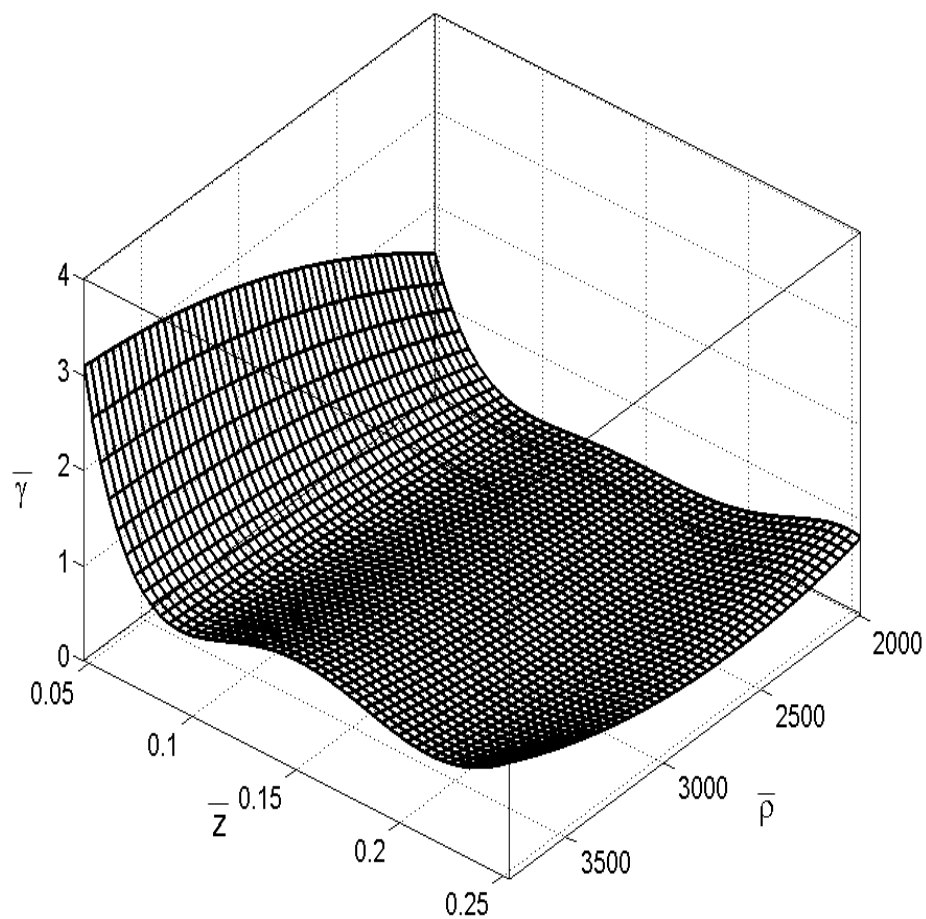


Рисунок 4.30.

Распределение средних размеров капель в кромочном капельном следе в зависимости от параметра $\bar{\rho}$ и расстояния от выходной кромки \bar{z} при начальной влажности $y_0=3,4\%$

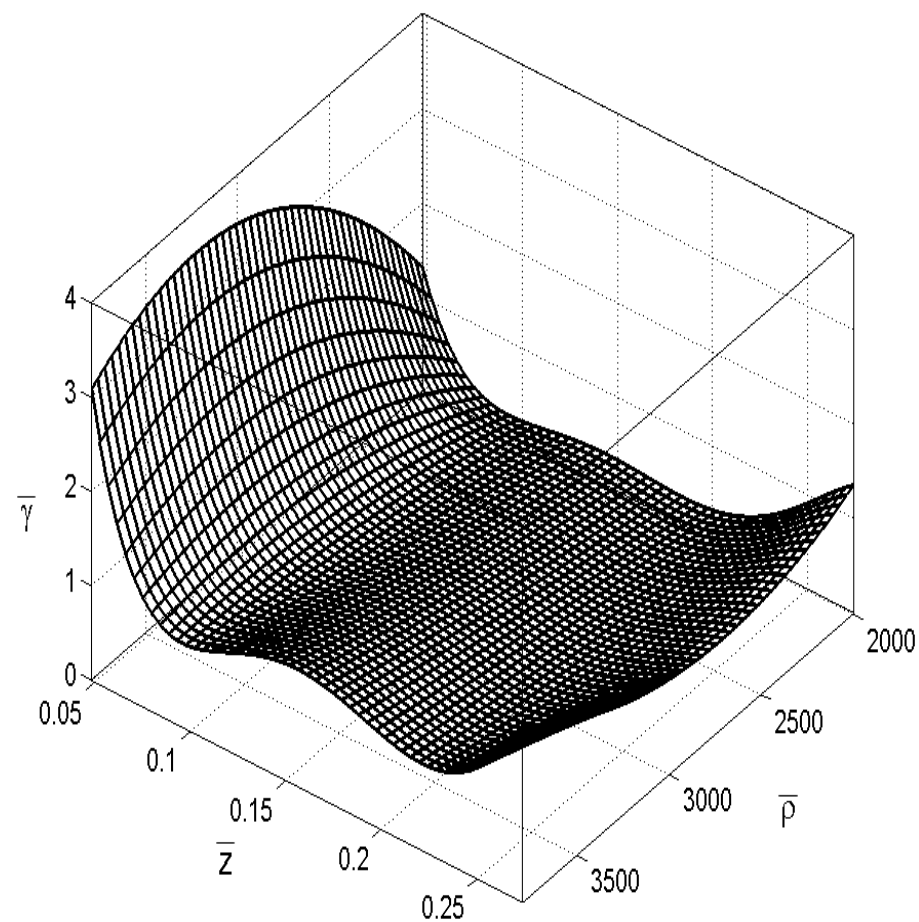


Рисунок 4.31.

Распределение средних размеров капель в кромочном капельном следе в зависимости от параметра $\bar{\rho}$ и расстояния от выходной кромки \bar{z} при начальной влажности $y_0=8,4\%$

Выводы по работе

Данная работа продолжает цикл исследований, направленных на изучение структуры дискретной фазы за сопловой решеткой. Разработан и применен принципиально новый подход для исследования полидисперсных потоков, который совмещает в себе экспериментальные данные, полученные с помощью системы лазерной диагностики, и информацию о численном моделировании влажнопарового потока. Получены важные данные о характере движения крупнодисперсной влаги в межосевом зазоре ступени.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Доказана возможность применения программного комплекса ActualFlow, реализующего корреляционный метод определения векторов скоростей дискретных частиц (PIV) для экспериментального определения характеристик полидисперсных влажно паровых потоков в элементах проточных частей турбомашин.
2. Разработана и апробирована экспериментально-расчетная методика бесконтактного определения средних размеров крупных капель, которые движутся в основном потоке с ускорением и со скольжением по отношению к паровой фазе. Для этого выполнена модификация компонентов CFD кода Ansys Fluent 14, которая позволила применять численные методы и совмещать результаты расчетов параметров паровой фазы с результатами экспериментального исследования характеристик жидкой фазы.
3. Получены характеристики потока за сопловой решеткой, которые могут быть использованы при проектировании ступеней турбин, работающих в области влажного пара. Экспериментально определены характерные траектории движения, распределение коэффициентов скольжения, углов, диаметров крупных капель за изолированной сопловой решеткой.
4. При проектировании ступени и систем разрушения или удаления крупнодисперсной влаги необходимо учитывать основные источники крупных капель в потоке за изолированной сопловой решеткой и особенности процессов их формирования.

4.1 Крупные капли со стороны спинки профиля являются первичной влагой, формируемой перед исследуемым каналом и пересекающей кромочный след лопатки или выбивающей дискретные частицы из него. Их средний размер составляет 10 – 15 мкм.

4.2 Движение капель в кромочном следе характеризуется активным дроблением влаги на начальном участке траектории с дальнейшим выравниванием средних размеров капель. На расстоянии $0,23b - 0,25b$ от выходной кромки лопатки начинаются процессы коагуляции и роста средних диаметров.

4.3 При развитом пленочном течении на вогнутой стороне профиля (при начальной влажности $y_0=8,4\%$) интенсифицируются процессы срыва и отражения капель с ее поверхности, что способствует формированию потока крупных капель за сопловой решеткой.

5. На формирование и характеристики потоков крупнодисперсной влаги существенное влияние оказывает степень влажности перед решеткой, а также соотношение плотностей паровой и жидкой фаз.

5.1 Изменение начальной влажности в диапазоне $y_0 = 3 - 9\%$ при $\bar{p} = 2581$ не приводит к существенным изменениям v , α_k , d_k капель, движущихся со стороны спинки лопатки.

5.2 С увеличением начальной влажности до $y_0 = 8,4\%$ при $\bar{p} = 2581$ наблюдается рост средних размеров капель с 15 мкм до 20 мкм на границе капельного следа со стороны вогнутой поверхности лопатки, что обусловлено появлением нового источника формирования потока крупных капель.

5.3 В кромочном капельном следе с ростом начальной влажности от 3,4% до 8,4% при $\bar{p} = 2581$, средние размеры капель вблизи выходной кромки изменяются от 85 мкм до 115 мкм.

5.4 Изменение давления, а, следовательно, и плотности паровой фазы оказывает существенное влияние на структуру капельного потока. Уменьшение коэффициента \bar{p} от 3790 до 1994 приводит к интенсификации процессов

механического взаимодействия фаз – увеличивается ускорение капель на начальных участках траектории в кромочном следе, углы выхода капель уменьшаются, средние размеры капель в кромочном капельном следе снижаются в 3,5 раза. Поток крупных капель со стороны спинки лопатки вырождается, а область проявления крупнодисперсной влаги уменьшается.

6. На основе экспериментальных данных разработаны рекомендации по применению CFD-кода Ansys Fluent 14, проверенные по результатам расчета влажного пара в каналах различной геометрии в рабочем для проточных частей турбомашин диапазоне параметров. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета и экспериментов, полученных, в том числе, различными авторами.

В проведенной работе было явно получено подтверждение наличия нескольких источников крупных капель в потоке за сопловой решеткой. Впервые были обозначены основные траектории движения и средние размеры крупнодисперсной влаги в межосевом пространстве ступени и определена степень влияния различных режимных параметров на характеристики капель, двигающихся вдоль них. Эти результаты могут использоваться как исходные данные для изучения характера натекания дискретных частиц на входные кромки рабочих лопаток. Это в перспективе позволит определить наиболее оптимальную величину межосевого зазора при решении проблемы эффективности и надежности проточной части последних ступеней паровой турбины.

Были предприняты первые шаги в направлении создания расчетной модели влажного пара, которая могла бы учитывать большинство физических процессов, связанных с наличием в потоке дискретной фазы. Естественно, современные вычислительные мощности не позволяют производить расчет, в котором рассматривалась бы каждая отдельная капля, однако получить осредненную картину течения двухфазного потока, по мнению автора, на данный момент уже возможно. Гибкая настройка CFD кода Ansys Fluent через написание отдельных UDF модулей позволит в дальнейшем, на основе уже имеющихся экспериментальных данных, описать процессы формирования движения и срыва в

поток водяной пленки; дробления, отражения, выбивания капель и так далее. Для верификации полученных математических моделей можно в полной мере использовать представленные в настоящей работе экспериментальные данные.

Разработанная в настоящей работе методика определения размеров капель в перспективе может быть использована для контроля дисперсного состава в проточных частях натуральных паровых турбин. Основными ее достоинствами являются: минимальное аэродинамическое воздействие на поток, возможность установки оптических эндоскопов в межосевой зазор ступени, получение данных о размере капель не в точке, как это было ранее, а в определенной плоскости исследования. Важным аспектом развития представленного в настоящей работе подхода, является то, что знания о распределении коэффициентов скольжения капель по концентрации позволят в дальнейшем, используя методы многомерной минимизации получать не только средние размеры частиц, но рассчитывать их распределения по массе и определять средние модальные размеры по массе и концентрации. Таким образом, существует возможность доработки данной методики для получения исчерпывающих данных о дисперсном составе жидкой фазы.

Возможность применения метода Endoscopic PIV, который определяет векторные поля трассеров в объеме, позволит существенно расширить область применения разработанного метода.

Список используемой литературы

1. Абрамов Ю.И. Исследование внутриканальной сепарации влаги из проточной части турбин: дис. канд. техн. наук. Москва. 1970. 179 с.
2. Абрамов Ю.И. Силин А.В. Образование крупнодисперсной влаги на выходных кромках сопловых аппаратов турбин влажного пара // Теплоэнергетика. 1977. № 3. С. 31 – 35.
3. Аветисян А.Р., Зайчик Л.И., Филиппов Г.А. Влияние турбулентности на стационарную и нестационарную спонтанную конденсацию пара в трансзвуковых соплах // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 5. С. 717-724.
4. Аль-Мухаммед Мухаммед Джавад. Повышение эффективности сопловых решеток турбин на влажном паре изменением геометрических параметров и гидрофобными присадками: дис. канд. техн. наук. Москва. 1985.
5. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы. М.: МЭИ. 2008. 671 с.
6. Анисимова М.П., Стекольников Е.В. Потери энергии в двухфазном потоке от механического взаимодействия фаз // Инженерно-физический журнал. 1968. Том XV. №3. С. 436-442.
7. Спектр размеров капель крупнодисперсной влаги за турбинной ступенью с большими окружными скоростями рабочих лопаток / С.М. Базаров [и др.] // Энергомашиностроение. 1970. № 12. С. 16 – 18.
8. Басина И.П., Максимов И.А. Исследование аэродинамического сопротивления сферической частицы при теплообмене и горении // Теплоэнергетика. 1969. № 1. С. 75 - 77.
9. Венедиктов В.Д. Газодинамика охлаждаемых турбин. М.: Машиностроение. 1990. 240 с.
10. Гаврилов И.Ю., Грибин В.Г., Тищенко А.А. Методика применения метода РТВ для исследования влажного и насыщенного пара // Радиотехника, электротехника и энергетика: 18 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2012. Том 4. С. 243.

11. Гаврилов И.Ю., Грибин В.Г., Тищенко А.А. Разработка методики применения лазерной диагностики для исследования изолированных решеток турбомашин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 17 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2011. Том 3. С. 228 – 229.
12. Исследование структуры влажно-парового потока в элементах проточных частей турбомашин / И.Ю. Гаврилов [и др.] // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 16 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2010. Том 3. С. 268 – 269.
13. Результаты экспериментального исследования влияния вдува греющего пара на характеристики жидкой фазы за турбинной решеткой / И.Ю. Гаврилов [и др.] // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 19 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2013. Том 4. С. 179 - 180.
14. Георгиев К.Г. Исследование вихревых и сопловых течений влажного пара капельной структуры: дис. канд. техн. наук. Москва. 1978. 227 с.
15. Глушков В.И. Исследование структуры влажного пара в турбинных решетках: дис. канд. техн. наук. Москва. 1971. 184 с.
16. Головин В.А., Разработка и исследование ЛРА для однофазных и двухфазных сред // Проблемы совершенствования и исследования турбомашин: Труды МЭИ. 1975. № 306. С. 65-71.
17. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия. 1970. 424 с.
18. Грибин В.Г., Коршунов Б. А., Тищенко А. А. Исследование внутриканальной сепарации влаги в турбинных сопловых решетках // Теплоэнергетика. 2010. №9. С. 17 – 20.
19. Особенности образования жидкой фазы и формирования структуры потока пара в сопловой решетке / В.Г. Грибин [и др.] // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 24 – 29.

20. Визуализация линий тока и методы комплексной визуализации дискретных векторных полей / К.В. Дедкова [и др.] // Забабахинские научные чтения: Тез. докл. VII международной конф. Снежинск. 2003. С. 209-210.
21. Дейч М. Е. Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат. 1996. 528 с.
22. Дейч М.Е. Некоторые проблемы экономичности и надежности влажнопаровых турбин // Известия АН СССР Энергетика и транспорт. 1984. № 1. С. 56-74.
23. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия. 1974. 592 с.
24. Дейч М.Е., Абрамов Б.И., Хизанашвили М.Д. Вопросы проектирования и расчета систем внутриканальной сепарации // Теплоэнергетика. 1972. № 8. С. 78 – 82.
25. Дейч М.Е., Абрамов Ю.И. Исследование структуры жидкой фазы в сопловых решетках ступеней на влажном паре // Теплоэнергетика. 1977. № 8.
26. Дейч М.Е., Абрамов Ю.И., Глушков В.И. О механизме движения влаги в сопловых каналах турбин // Теплоэнергетика. 1970. № 11. С. 34 – 38.
27. Исследование процесса сепарации жидкости с поверхностей направляющих аппаратов турбинных ступеней / М.Е. Дейч [и др.] // Теплоэнергетика. 1968. №11. С. 69 – 71.
28. Исследование внутриканальной сепарации влаги в турбинной ступени / М.Е. Дейч [и др.] // Теплоэнергетика. 1969. №3. С. 77 – 79.
29. Дейч М.Е., Салтанов Г.А., Сивобород В.А. Численное исследование смешанных разрывных течений в решетках турбомашин // Известия АН СССР серия Энергетика и транспорт. 1979. № 2. С. 135 – 141.
30. Дейч М. Е., Филиппов Г. А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 471 с.
31. Дейч М.Е., Филиппов Г. А. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат. 1987. 327 с.

32. Дейч М.Е., Филиппов Г. А. Пути повышения экономичности и надежности турбин влажного пара // Известия АН СССР Энергетика и транспорт. 1977. № 5. С. 53 – 71.
33. Дейч М.Е., Филиппов Г. А., Шишкин Д. А. Некоторые результаты исследования сопловых решеток на влажном паре // Теплоэнергетика. 1969. №9. С. 76 – 79.
34. Деллер Ш.В. Разработка и исследование сопловых решеток малой относительной высоты: дис. канд. техн. наук. Москва. 1991. 247 с.
35. Дикарев В.И. Исследование влияния влажности пара на характеристики турбины при переменных режимах: дис. канд. техн. наук. Москва. 1978. 193 с.
36. Завадовский А.М., Беркович А.Л. Некоторые вопросы исследования решеток турбинных профилей // Теплоэнергетика. 1965. №10. С. 63-68.
37. Исследование внутриканальной сепарации и структуры потока влажного пара в решетках / Ф.В. Казинцев [и др.] // Сборник трудов НТК МЭИ. 1970.
38. Камзолов В.Н., Маслов Б.Н., Пирумов У.Г. Исследование траекторий частиц в соплах Лаваля // Известия АН СССР Механика жидкости и газа. 1971. № 5. С. 136 – 143.
39. Карлсон Д., Хоглунд Р. Сопротивление и теплоотдача частиц в соплах ракетных двигателей // Ракетная техника и космонавтика. 1964. № 11. С. 104 -109.
40. Влияние крупнодисперсной влаги на эффективность ступеней мощных паровых турбин / И.И. Кириллов [и др.] // Теплоэнергетика. 1973. №10. С. 62 – 64.
41. Кириллов И.И., Фаддеев И.П., Циглер Х.Х. Исследование плоских решеток сопловых лопаток на влажном паре // Энергомашиностроение 1968. № 6. С. 36 – 37.
42. Кириллов И.И., Фаддеев И.П., Циглер Х.Х. Экспериментальное исследование плоских решеток профилей на влажном паре // Известия вузов. Энергетика. 1966. № 5. С. 54 – 59.

43. Кириллов И.И., Фаддеев И.П., Шубенко А.Л. Сепарирующая способность решеток турбинных профилей, работающих на влажном паре // Энергомашиностроение. 1970. №10. С. 40-41.
44. Кириллов И.И., Яблоник Р.М. Основы теории влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1968. 264 с.
45. Дробление пленок влаги на сходе с кромок сопловых лопаток паровых турбин / И.И. Кириллов [и др.] // ИФЖ. 1968. Том XV. № 1. С. 85 – 90.
46. Исследование структуры влажного пара в многоступенчатой турбине / В.И. Кирюхин // Теплоэнергетика. 1975. № 5. С. 23-25.
47. Комплексы измерительно-вычислительные МЭС. Руководство по эксплуатации. Научно-производственное предприятие «Мера». 2006.
48. Косяк, Ю.Ф. Паротурбинные установки атомных электростанций. М.: Энергия, 1978. 311 с.
49. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. М.: Энергоатомиздат. 1985. 248 с.
50. Олесевич К.В. Расчет траекторий движения твердых частиц в проточной части турбин // Энергомашиностроение. 1970. №12. С. 10 – 13.
51. Ощепков М.Ю. Пульсации давления в отрывных течениях конденсирующегося и влажного пара: дис. канд. техн. наук. Москва. 1994. 196 с.
52. Поваров О.А. Разрушение жидкой пленки за выходной кромкой пластины // Известия вузов, Серия Энергетика. 1980. №10. С. 70 – 73.
53. Преобразователь давления измерительный СДВ. Руководство по эксплуатации. Научно-производственный комплекс «ВИП». 2009.
54. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах [и др.] М.: Машиностроение. 1964. 525 с.
55. Рейнджер П., Никколс Р. Аэродинамическое дробление капель в потоке // Ракетная техника и космонавтика. 1969. Том № 7. № 2. С. 113 – 119.
56. Руководство по эксплуатации измерителя давления ИДК - 16. Научно-производственное предприятие «Мера». 2010.

57. Руководство пользователя программы «ActualFlow». Институт Теплофизики СО РАН. Новосибирск, 2008.
58. Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 8 – 13.
59. Савостьянов В.А. Исследование вихревых кромочных следов: дис. канд. техн. наук. Москва. 1980. 226 с.
60. Салтанов Г.А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике. М.: Наука. 1979. 286 с.
61. Сивобород В.А. Расчетно-теоретическое исследование двухфазных течений в каналах решетках турбин: дис. канд. техн. наук. Москва. 1979. 147 с.
62. Экспериментальное исследование влияния начального состояния пара на характеристики жидкой фазы в решетках турбомашин / В.А. Симанов [и др.] // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 17 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2011. Том 3. С. 252.
63. Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Грибин В.Г. Апробация расчетно-экспериментальной методики определения дисперсного состава жидкой фазы в полидисперсном двухфазном потоке // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 19 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2013. Том 4. С. 200.
64. Тетера И.П., Головин В.А. и др. Исследование влияния режимных параметров течения на стабилизацию тонкой жидкой пленки // Труды МЭИ. 1976. № 306. С. 38-39.
65. Тишин А.П., Хайрутдинов Р.И. К расчету коагуляции частиц конденсата в соплах лавая // Известия АН СССР серия Механика жидкости и газа. 1971. № 5. С.181 – 185.
66. Тищенко В.А., Грибин В.Г. Исследование динамики движения жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой // Радиоэлектроника, электротехника и

энергетика: 18 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2012. Том 4. С. 253 - 254.

67. Тищенко В.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А. Исследование взаимодействия жидкой фазы со скачками конденсации и уплотнения во влажнопаровых потоках // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 17 международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. международной конф. Москва. 2011. Том 3. С. 253 - 254.

68. Тищенко В.А. Экспериментальное исследование характеристик полидисперсных двухфазных потоков в элементах проточных частей турбомашин: дис. магистра техники и технологии. Москва. 2010. 136 с.

69. Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. Паровые и газовые турбины атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.

70. Фаддеев И.П. Эрозия влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение. 1974. 207 с.

71. Фаддеев И.П., Радик С.В. Движение крупнодисперсной влаги в осевом зазоре и рабочих каналах ступени ЧНД турбины // Теплоэнергетика. 1973. №12. С. 31 – 35.

72. Филиппов Г.А., Аветисян А.Р. Расчетное исследование течения влажного пара в комбинированном выхлопе паровых турбин АЭС // Теплоэнергетика. 2010. № 9. С.26 – 31.

73. Разработка методики применения лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсных влажнопаровых потоков / Г.А. Филиппов [и др.] // Известия РАН серия Энергетика. 2010. № 6. С. 11 – 20.

74. Экспериментальное исследование влияния начальной влажности на распределение параметров эрозионно-опасной жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой / Г.А. Филиппов [и др.] // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 55 – 61.

75. Влияние влажности на экономичность паровых турбин / Г.А. Филиппов [и др.] // Известия АН Энергетика. 2012. № 6. С. 96 – 107.

76. Филиппов Г.А., Коробков В.В. Влияние эрозии лопаток на величину предельной влажности за последней ступенью // Теплоэнергетика. 1973. № 12. С. 14 – 18.
77. Филиппов Г.А., Неккер Р., Селезнев Л.И. К расчету возникновения влаги в проточных частях турбин // Теплоэнергетика. 1977. № 7. С. 9 – 14.
78. Филиппов Г.А., Поваров О.А., Васильченко Е.Г. Экспериментальное исследование волновых режимов течения жидких пленок в спутном газовом потоке // Теплоэнергетика. 1978. № 5. С. 31 – 34.
79. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Игнатъевский Е.А. Анализ конденсации пересыщенного пара в турбинных ступенях // Теплоэнергетика. 1970. №12. С. 22 - 26.
80. Филиппов Г.А., Поваров О.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980. 321 с.
81. Хизанашвили М.Д. Исследование структуры потока влажного пара в сопловых решетках и внутриканальная сепарация: дис. канд. техн. наук. Москва. 1973. 227 с.
82. Циглер Х.Х. Сепарация влаги в лопаточном канале паровой турбины // Энергомашиностроение. 1967. №4. С. 23-25.
83. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. М.: Диалог – Мифи. 1996. 241 с.
84. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехиздат, 1951. 288 с.
85. Шишкин Д.А. Исследование аэродинамических характеристик сопловых турбинных решеток на влажном паре: дис. канд. техн. наук. Москва. 1970. 137 с.
86. Школьник Г.Т., Ушаков С.Г. Движение твердых частиц в межлопаточных каналах паровых турбин // Теплоэнергетика. 1971. №3. С. 32-35.
87. Шлихтинг К. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 711 с.

88. Штястны М., Тайч Л. Экспериментальное исследование жидкой фазы в последней ступени паровой турбины 200 МВт // Тезисы доклада VI конференции по паровым турбинам. 1976. Пльзень.
89. Яблоник Р.М., Лагерев В.В. Исследование течения влажного пара в направляющих каналах паровых турбин // Теплоэнергетика. 1963. № 11. С. 55 – 60.
90. Abid R., Speziale C. G. Predicting equilibrium states with Reynolds stress closures in channel flow and homogeneous shear flow // Phys. Fluids A. 1993. V. 5. № 7. P. 1776-1782.
91. Ansys Fluent 14 Documentation. SAS IP. 2011.
92. Avetisyan A. R., Alipchenkov V.M., Zaichik L.I. The Effect of Turbulence on the flow of spontaneously condensing moist steam in Laval nozzles // High temperature. 2003. V. 41. № 1. P. 57-61.
93. Bakhtar F., Ebrahimi M., Bamkole B.O. On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in nucleating steam. Part 2: Wake traverse // Proc. I. Mech. E. Part C (J. Mech. Eng. Sci.). 1995. № 209. P. 169-177.
94. Carlson D.J., Høglund R.F. Particle drag and heat transfer in rocket nozzles // J. AIAA. 1964. V. 2. № 11 P. 1980-1984.
95. Danmei Xie, Xinggang Yu, Wangfan Li, Youmin Hou, Yang Shi, Sun Cai. Numerical simulation of water droplets deposition on the last-stage stationary blade of steam turbine // Energy and power engineering. 2010. №2. P. 248 – 253.
96. Dykas S., Wróblewski W. Application of an in-house CFD code for steam flow modeling in a Baumann stage // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1CD.
97. Filippov G., Gribin V., Tishchenko A., Gavrilov I., Tishchenko V. Experimental studies of wet-steam polydisperse flows in turbine blade cascades // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1CD.

98. Fujisawa N., Hosokawa A., Tomitatsu S. Simultaneous measurement of droplet size and velocity field by an interferometric imaging technique in spray combustion // *Measurement Science and Technology*. 2003. № 14. P. 1341-1349.
99. Garcia D. A fast all-in-one method for automated post-processing of PIV data // *Exp Fluids*. 2011. №50. P. 1247-1259.
100. Garcia D. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values // *Computational Statistics and Data Analysis*. 2010. № 54. P. 1167-1178.
101. Gatski T.B., Speziale C.G. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows // *J. Fluid Mech.* 1993. № 254. P. 59-78.
102. Glover A.R., Skippon S.M, Boyle R.D. Interferometric laser imaging for droplet sizing: a method for droplet-size measurement in sparse spray systems // *Applied Optics*. 1995. № 36. C. 8409-8421.
103. Gyarmathy G. Grundlagen einer Theorie der Nassdampfturbine. Zürich, 1962.
104. Hanson A. R., Domich E. G., Adams H. S. Shock tube investigation of the breakup of drops by air blast // *Physics of Fluids*. 1966. V. 6. № 8. P. 1070 – 1080.
105. IAWPS Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance. The International Association for the Properties of Water and Steam. 1994. 5 с.
106. Ishazaki K., Ikohagi T., Daiguji H. A High-Resolution Numerical Method for Transonic Non-equilibrium Condensation Flows Through a Steam Turbine Cascade // Тезисы доклада конференции “In Proceedings of the 6th International Symposium on Computational Fluid Dynamics”. 1995. C. 479–484.
107. Jayaratne O. W., Mason B. J. The coalescence and bouncing of water drops at an air/water interface // *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1964. V. 280. № 1383. P. 545-565.
108. Kegalj M., Schiffer H. P. Endoscopic PIV measurements in a low pressure turbine // *Exp. Fluids*. 2009. № 47. P. 689 – 705.

109. Kryzanovski J. Wspólczesne problem przeplywu pary w ostatnich stopniach turbin kondensacyjnych // Ciepłne maszyny przeplywawe, tooz. 1981. №389. C. 141-157.
110. Launder B. E., Spalding D. B.. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England. 1972. 176 c.
111. Lehr A., Bolcs A. Application of a Particle Image Velocimetry (PIV) System to the Periodic Unsteady Flow Around an Isolated Compressor Blade // 15 Bi-annual Symposium on Measurement Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines: Тез. докл. международной конф. Florence . 2000.
112. Moore M. J., Sieverding C. H. Two phase steam flow in turbine and separators. Washington.: McGraw-Hill Book Co. 1976. 399 c.
113. Morsi S. A., Alexander A. J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // J. Fluid Mech. 1972. V. 55. № 2. P. 193-208.
114. Pan G., Shakal J., Lai W., Calabria R., Massoli P. Simultaneous gloal size and velocity measurements of droplets and sprays // 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems Тез. докл. международной конф. Orleans. 2005.
115. Petr V., Kolovratnik M. Wet steam energy loss and related Baumann rule in a 1000 MW nuclear and a 210 MW fossil-fired LP steam turbine // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1CD.
116. Phong, Bui-Tuong. Illumination for Computer Generated Images. Doctorial thesis, University of Utah, 1973.
117. Pilch M., Erdman C. A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop // Int. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13. № 6. P.741 – 757.
118. Qulan Zhoum, Na Li, Xi Chen, Akio Yonezu, Tongmo Xu, Shien Hui, Di Zhang. Water drop erosion turbine blades: numerical framework and application // Materials Transactions. 2008. V. 49. № 7. P. 1606 – 1615.
119. Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance. The International Association for the Properties of Water and Steam. Germany. 2008. 9 c.

120. Release on the IAPWS Formulation 2011 for the Thermal Conductivity of ordinary Water Substance. The International Association for the Properties of Water and Steam. Plzeň. 2011. 15 c.
121. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. The International Association for the Properties of Water and Steam. The Netherlands. 2009. 18 c.
122. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. The International Association for the Properties of Water and Steam. Switzerland. 2007. 49 c.
123. Sakar S., Speziale C. G. A simple nonlinear model for the return to isotropy in turbulence // *Phys. Fluids A*. 1990. V. 2. № 1. P. 84-93.
124. Scarano F., Haertig J., Application of non-isotropic resolution PIV in supersonic and hypersonic flows // 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry Busan: Тез. докл. международной конф. Korea. 2003.
125. Schatz M., Eberle T. Experimental study of steam wetness in a model steam turbine rig: presentation of results and comparison with CFD data // *Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф.* Cambridge. 2012. 1CD.
126. Selberg B. P., Nicholls J. A. Drag coefficient of small spherical particles // *AIAA Journal*. 1968. Том 6. № 3. С. 401 – 408.
127. Souverein L.J. Aerodynamic loads determination in supersonic and hypersonic flows based on PIV. Delft University of Technology.
128. Speziale G. On nonlinear K-1 and K- ϵ models of turbulence // *J. Fluid Mech.* 1987. V. 178. P. 459-475.
129. Starzmann J., Schatz M., Casey M. V., Mayer J. F., Sieverding F. Modelling and validation of wet steam flow in a low pressure steam turbine // *ASME Turbo Expo 2011: Тез. докл. международной конф.* Vancouver. 2011. 1CD.
130. Stazmann J., Casey M., Mayer J., Sieverding F. Wetness loss prediction for a low pressure steam turbine using CFD // *Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф.* Cambridge. 2012. 1CD.

131. Tomohiko Tsukuda, Hiroyuki Kawagishi, Naoki Shibukawa, Tadayuki Hashidate, Koichi Goto. Influence of wetness on efficiency of the full scale size low pressure turbines // ASME Turbo Expo 2012: Тез. докл. международной конф.. Copenhagen. 2012. 1CD.
132. Watanabe E., Ohyama H., Tsutsumi M., Maruyama T., Tabata S. Comprehensive research of wetness effects in steam turbines // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1CD.
133. White A. J., Young J. B., Walters P. T. Experimental validation of condensing flow theory for stationary cascade of steam turbine blades // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1996. V. № 354. № 1704. P. 59-88.
134. Winnikow S., Chao B. T. Droplet motion in purified systems // The Physics of Fluids. 1966. V. 9. № 1. P. 50 – 61.
135. Woisetschläger J., Göttlich E. Recent Application of Particle Image Velocimetry to flow research in thermal turbomachinery // Particle Image Velocimetry Topics in Applied Physics. 2008. V. 112. P. 311 – 331.
136. Xiaoshu Cai, Li Ma, Chang Tian, Junfeng Li, Deiliang Ning, Wei Xu. Measurement of coarse water in steam turbines // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1CD.
137. Young J. B. An equation of state for steam turbomachinery and other flow calculations // Journal of Engineering for gas turbines and power. 1988. V. 110. № 1. P. 1-7.
138. Young J. B., Yau K. K., Walters P. T. Fog droplet deposition and coarse water formation in low-pressure steam turbines: a combined experimental and theoretical analysis // Journal of Turbomachinery. 1988. V. 110. № 2. P. 163 – 172.
139. Young J. B., Yau K. K., Walters P. T. The inertial deposition of fog droplets on steam turbine blades // Journal of Turbomachinery. 1988. V. 110. № 2. P. 155 – 162.

ОТЗЫВ

**Научного руководителя по диссертации на тему:
«Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы
влажно парового потока в элементах проточных частей турбомашин»,
представленной аспирантом Тищенко Виктором Александровичем на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.04.12 «Турбомашинны и комбинированные турбоустановки»**

Тищенко В.А. в 2010 г. получил степень магистра техники и технологии в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)» по направлению «Энергомашиностроение», специализация «Паровые и газовые турбины». В 2010-2013 г. учился в аспирантуре на кафедре паровых и газовых турбин ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», которую окончил с представлением диссертации к защите. В настоящее время работает ассистентом на кафедре паровых и газовых турбин.

Тищенко В.А. был принят на должность старшего лаборанта кафедры паровых и газовых турбин ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» в конце третьего курса. Его научная деятельность посвящена изучению вопросам течения влажного пара в элементах проточных частей турбомашин.

Перед Тищенко В.А. была поставлена комплексная научная задача:

- Разработать принципиально новый экспериментально обоснованный подход измерения характеристик жидкой фазы во влажно паровом потоке с использования систем лазерной диагностики.
- Апробировать разработанные методы и подходы при исследовании структуры капельного потока в элементах проточных частей турбомашин.

Экспериментальные и расчетные исследования он проводил в лаборатории оптико-физических исследований кафедры. Эта лаборатория на протяжении нескольких десятилетий была одним из основных центров изучения влажно паровых потоков в стране и в мире вплоть до 90-х годов. С 1994 года до 2007 экспериментальное оборудование не эксплуатировалось, а применяемые в лаборатории системы измерения морально устарели. Поэтому на первом этапе своей работы Тищенко Виктором Александровичем был решен ряд задач, связанных с реконструкцией лаборатории. Он принимал непосредственное участие в разработке тепловой схемы экспериментальных стендов, выборе вспомогательного оборудования. Также он курировал строительные-монтажные работы. Проведенный им анализ современных методов исследования потоков позволил сформулировать техническое задание по выбору системы пневмометрических измерений, системы лазерной диагностики потоков, системы скоростной фото и видео фиксации быстро

протекающих процессов. Тищенко В.А. напрямую контактировал с разработчиками систем измерения, что позволило ему в довольно сжатые сроки освоить современное оборудование.

Тищенко Виктором Александровичем разработана методика применения системы лазерной диагностики для изучения влажно паровых потоков. Важно отметить, что до настоящего момента эти методы исследования не применялись в условиях полидисперсных конденсирующихся сред. Он смог расширить возможности реализуемого в системе лазерной диагностики метода PIV, который был адаптирован для исследования движения крупных эрозионно-опасных капель в потоке. Полученные с его помощью данные о мгновенных и осредненных полях скоростей капель, дополненные результатами численного моделирования влажно парового потока используются для определения диаметров частиц жидкой фазы. Основным важным отличием новой методики бесконтактного определения средних размеров капель от уже имеющихся является то, что она определяет диаметры не в точке, а их распределение на плоскости с минимальным аэродинамическим воздействием на поток.

Тищенко В.А. в совершенстве освоил расчетный комплекс Ansys Fluent применительно к расчетам влажно паровых потоков. Необходимо отметить, что на данный момент в мире существует всего несколько экспериментальных работ, на основе которых можно проводить верификацию расчетов течения влажного пара. В своей диссертационной работе Тищенко В.А. апробировал CFD код применительно к рассматриваемым им элементам проточных частей турбомашин. Это позволило модифицировать некоторые компоненты CFD кода с целью повышения точности результатов численного моделирования. Совместно с аспирантом Гавриловым И.Ю. разработал программный пакет по пост-обработке результатов численного моделирования.

Разработанные подходы были применены для исследования влияния начального состояния пара и плотности среды на особенности движения крупнодисперсной влаги в области за сопловой решеткой. Были выявлены основные потоки эрозионно-опасных капель, определены их характеристики. Впервые экспериментально удалось определить распределения скоростей, углов и диаметров капель вдоль их траекторий. Результаты исследования могут быть использованы как исходные данные для анализа эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток, выбора межосевого зазора в ступени, оптимизации параметров систем влагоудаления.

Следует отметить, что выполненный Тищенко В.А. комплекс расчетно-экспериментальных исследований позволил получить результаты, возможности, получения которых раньше не было, в связи с техническим несовершенством методов исследования. По полученным результатам автор выступал с докладами на

различных научно-практических конференциях, опубликовал ряд статей в соавторстве, три из которых – в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, а одна индексируема в базах данных Scopus и Web of Science. Тищенко В.А. был удостоен диплома первой степени на XVI, XVII и XIX международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Тищенко В.А. является победителем VII Общероссийского конкурса молодежных исследовательских проектов в области энергетики «Энергия Молодости – 2010» фонда Global Energy.

Результат работы показал высокую профессиональную подготовку Тищенко В.А., его умение анализировать литературу (в том числе и иностранную), полученные экспериментальные данные, самостоятельно выполнять уникальные расчетно-экспериментальные исследования с применением современных методов.

В целом работа Тищенко В.А. направлена на совершенствование ступеней турбин, работающих в зоне фазовых переходов и течения двухфазного полидисперсного влажно парового потока на основе экспериментальных исследований с моделированием протекающих в них физических явлений. Реализация на практике полученных в работе результатов приведет к повышению экономичности и надежности паровых турбин.

По своему содержанию диссертация носит законченный характер, ее выводы и рекомендации обладают новизной и носят практический характер для производства.

Выполненная Тищенко В.А. работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные установки», а сам Тищенко В.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Научный руководитель,
заведующий кафедры
паровых и газовых турбин
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»
д.т.н., профессор

Грибин В.Г.



Грибин В.Г.