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 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2014

Диссертация выполнена на кафедре Паровых и газовых турбин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»)

| | |
|---|---|
| Научный руководитель | **Грибин Владимир Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой паровых и газовых турбин ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» |
| Официальные оппоненты | **Зейгарник Юрий Альбертович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФГБУ ОИВТ РАН |
| | **Жинов Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой тепловых двигателей и теплофизики Калужского филиала ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана |
| Ведущая организация | ОАО «НПО ЦКТИ» |

Защита диссертации состоится «18» июня 2014 г. В 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при ФГБОУ ВПО Московском государственном техническом университете им Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская набережная, д. 2/18, учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Московского государственного технического университета им Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, Москва, 2-я Баумансая ул., д.5, ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан «  » мая 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Тумашев Р.З.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы**

Несмотря на накопленный опыт проектирования и эксплуатации, остается острая необходимость в повышении эффективности и надежности основного оборудования ТЭС и АЭС.

Значительные резервы повышения эффективности и надежности имеются в проточных частях паровых турбин работающих на влажном паре, в особенности в областях последних ступеней ЦНД. При этом характер течения среды в этом участке проточной части изучен недостаточно. В первую очередь это связано с наличием дискретной среды в потоке влажного пара, что приводит к интенсификации сложных процессов термодинамического и механического межфазового взаимодействия. Имеющиеся на данный момент результаты экспериментальных и численных исследований влажнопаровых потоков позволили получить подробные фундаментальные представления о природе межфазовых взаимодействий. Однако прикладное применение этих знаний к конкретным инженерным задачам порой оказывается невозможным.

Одной из основных задач, до конца не изученных на данный момент, является вопрос образования и движения крупных эрозионно-опасных капель в межосевом зазоре турбины. Для полного анализа эффективности мероприятий по повышению надежности лопаточного аппарата последних ступеней ЦНД (сепарация жидких пленок из проточной части, использование новейших материалов и наплавок и так далее) необходимы знания о траекториях и характеристиках капель вдоль них (коэффициенты скольжения, направление движения, размеры). Активное развитие экспериментальных подходов исследования (системы лазерной диагностики, пневмометрических и оптических измерений), а также совершенствование численных методов 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. Применение корреляционного метода PIV (Particle Image Velocimetry), интегрированного в систему лазерной диагностики, позволяет определять поля скоростей дискретных частиц в потоке. Использование этих данных позволит экспериментально выявить траектории крупных капель в межлопаточном зазоре и определить их основные характеристики. Однако на данный момент подобные методики не применялись для исследования влажно паровых потоков.

**Цель работы**

Разработка и реализация экспериментально обоснованной методики определения параметров жидкой фазы влажно парового потока в элементах проточных частей турбомашин с использованием системы лазерной диагностики. При этом решались следующие задачи:

1. Разработать эффективную методику применения системы лазерной диагностики для определения скоростных характеристик крупных капель в потоке.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
2051833
Разработка и реализация ме

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. Апробировать 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.

**Научная новизна**

- Разработан метод применения системы лазерной диагностики для исследования характеристик жидкой фазы при течении влажно парового потока в проточных частях турбомашин.
- Разработана бесконтактная расчетно-экспериментальная методика определения средних размеров капель.
- Впервые экспериментально были определены характерные траектории движения крупных капель и распределение их основных параметров за сопловой решеткой.
- Проведена модификация расчетных моделей CFD кода Ansys Fluent для математического описания влажного пара.
- Получены обобщающие характеристики эрозионно-опасных капель за сопловой решеткой, которые подробно описывают особенности их движения в этой области.

**Практическая ценность**

– Разработанная методика может быть использована при изучении движения двухфазной среды в проточных частях паровых турбин.

– Полученные экспериментальные данные о движении крупных капель за сопловой решеткой могут быть использованы при анализе условий натекания частиц дискретной фазы на входные кромки рабочих лопаток.

– Данные о характеристиках крупнодисперсной влаги могут быть использованы при проектировании ступеней турбин.

– Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при верификации математических моделей движения влажно паровых потоков.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается проведением тестовых испытаний в изученной области изменения параметров для сопоставления полученных по разработанным методикам результатов с результатами ранее проведенных исследований с применением аттестованных измерительных устройств и апробированных методик измерений.

**Автор защищает**

1. Методику применения системы лазерной диагностики и метода PIV для исследования влажно паровых потоков.

2. Экспериментально-расчетную методику бесконтактного определения средних размеров капель в потоке влажного пара.
3. Результаты экспериментальных исследований структуры капельного потока и характеристик эрозионно-опасных частиц жидкой фазы за изолированной сопловой решеткой.

**Апробация работы**

Основные результаты настоящей работы докладывались на следующих научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах:

1. Международные научно-технические конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ», Москва, 2009-2013 г;
2. Power System Engineering, Termodynamics & Fluid Flow ES 2010. Department of power system engineering faculty of mechanical engineering university of Bohemia. Pilsen. 2010;
3. 3-я конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ». ОАО «Силовые машины». Санкт-Петербург. 2012 г;
4. Baumann Centunary Wet Steam Conference. Cripps Court conference centre, Magdalene College. Cambridge. 2012;
5. Научный семинар НЦ «Газодинамика», ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ». Москва. 2013.

**Реализация результатов работы**

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры паровых и газовых турбин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет МЭИ»

**Публикации**

По результатам диссертационной работы было опубликовано 4 научные статьи, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 7 докладов на научно-технических конференциях.

**Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы, изложена на 211 страницах машинописного текста, содержит 124 рисунка, 3 таблицы и библиографию из 139 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрены направления перспективных исследований течения влажнопаровых потоков в проточных частях турбомашин.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный особенностям движения дискретной фазы в последних ступенях турбомашин, методам экспериментального исследования параметров дискретных частиц, влиянию различных режимных параметров на характеристики жидкой фазы в межосевом зазоре ступени, источникам образования крупнодисперсных капель в проточной части турбины. Рассмотрен PIV (Particle Velocimetry Tracking)

метод, интегрированный в систему лазерной диагностики потоков. Он позволяет определять мгновенные поля скоростей трассеров, движущихся в потоке. Обзор литературы показал, что система лазерной диагностики для исследования движения дискретных фаз, после некоторых доработок, может быть использована для комплексного изучения параметров полидисперсного потока. В отличие от ранее применяемых точечных методов, PIV метод позволяет получить распределение основных параметров капель в плоскости. По итогам обзора литературы были сформулированы задачи и поставлены цели для данной работы.

**Во второй главе** приводится описание комплексной методики экспериментального измерения параметров влажно парового потока в элементах проточных частей турбомашин, а также рассматривается процесс математического моделирования течения двухфазной среды в CFD коде Ansys Fluent 14.

Исследования проводились на экспериментальном пародинамическом стенде КВП – 2, позволяющем исследовать течение перегретого, насыщенного и влажного пара в элементах протонных частей турбомашин при различных скоростях потока. Рабочее тело для исследований берется из отбора паровой турбины ТЭЦ МЭИ и в перегретом состоянии поступает на экспериментальный стенд. Для изменения начального состояния пара от перегретого до насыщенного, используются две ступени увлажнения. Они снижают температуру перегрева путем впрыска охлаждающей питательной воды. Формирование полидисперсного влажнопарового потока осуществляется за счет пародутьевых форсунок, установленных в баке-ресивере стенда КВП-2. Они впрыскивают питательную воду в паровую среду, находящуюся в состоянии насыщения. Тем самым образуются частицы дискретной фазы, среднемассовый размер которых составляет 25 – 30 мкм. Путем изменения расхода воды, поступающей в ступени увлажнения и пародутьевые форсунки, производится регулирование начального состояния пара. Подготовленный таким образом влажно паровой поток поступает в исследуемый канал, после чего направляется в конденсатор и возвращается в технологический цикл ТЭЦ.

Изменение режима течения производилось посредством регулирования давления полного торможения в баке-ресивере перед исследуемым объектом и величины вакуума, поддерживаемого в конденсаторе.

В качестве штатных систем измерения, на стенде КВП-2 использовались:

- Измерительно-вычислительный комплекс MIC-300M, который предназначен для регистрации, сбора, обработки и представления данных о пневмометрических параметрах парового потока (давление, температура). Эта система в настоящей работе используется для измерения температуры полного торможения и статического давления. Измерения температуры полного торможения среды в баке-ресивере производится посредством термопары КТХК02.01-С10-И-1,0-1000/2000 (хромель – капель), а для определения распределения статического давления на поверхностях исследуемых каналов применялся парокоммутатор ИДК-16.

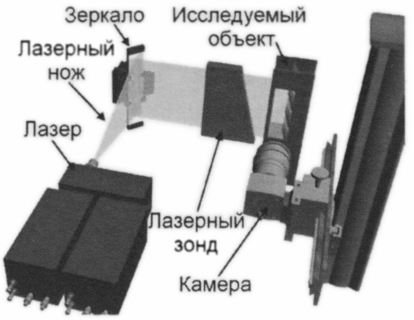


Рис. 1. Система лазерной диагностики «ПОЛИС»

• Теневой автоколлимационный прибор ИАБ-451, который предназначен для визуализации волновой структуры сверхзвукового потока сплошной среды (скачков уплотнения и конденсации). Регистрация изображения производилась посредством скоростной видеокамеры Видеоспринт-G6 (5000 кадров в секунду) и фотокамеры Видеоскан-285-2001 (8 кадров в секунду).

• Система лазерной диагностики потоков «ПОЛИС», которая использовалась для определения полей скоростей жидкой фазы посредством интегрированного в нее алгоритма PIV. Поток, в котором присутствуют трассеры, два раза с заданным интервалом времени освещается плоским лазерным лучом, сформированным сдвоенным импульсным лазером. Засвеченные капли фотографируются скоростной фотокамерой. Корреляционный алгоритм PIV, определяя смещение капель на втором кадре по отношению к первому, рассчитывает мгновенное поле скоростей капель в плоскости лазерного ножа. Последующий набор пар фотографий позволяет получить статистически осредненное поле скоростей. Схема системы лазерной диагностики представлена на Рис. 1.

• Зонд инерционного осаждения капель и микроскоп с фотокамерой DCIM510, которые использовались для измерения дисперсного состава крупных капель влажно парового потока.

Конфигурация экспериментального стенда позволяет производить исследования в каналах различной геометрии благодаря возможности использования съемных рабочих частей. Они были препарированы таким образом, чтобы обеспечить возможность применения всех выше описанных систем. В настоящей работе рассматривалось движение влажно парового потока в трех различных каналах:

• Плоское несимметричное сопло Лаваля (Рис. 2, а). Расчетный режим в канале достигается при величине относительного давления на выходном срезе $\varepsilon_a = 0{,}315$ и безразмерной скорости $\lambda = 1{,}34$. Величина $\varepsilon_a$ определяется:

$$\varepsilon_a = \frac{p_a}{p_0}, \qquad (1)$$

где $p_a$- статическое давление на срезе сопла; $p_0$- давление полного торможения перед исследуемым каналом.

Одна из стенок сопла была продренированна для измерения статического давления вдоль канала.

• Плоское симметричное суживающееся сопло (Рис. 2, б). Данный канал использовался для проверки разработанной методики бесконтактного определения средних размеров капель. В его боковой стенке организованны

отверстия для ввода зонда инерционного осаждения капель. Данные о дисперсном составе жидкой фазы, полученные с помощью него, сравнивались с результатами применения разработанной методики.

• Плоский пакет сопловых лопаток (Рис. 2, в). Решетка, состоящая из 5 каналов с относительным шагом $\bar{t} = 0{,}7$, образованных сопловыми лопатками с углом выхода 17,6° и хордой $b$ = 67,5 мм. Данный объект использовался при апробации разработанных методик для исследования характера движения дискретной фазы за сопловой решеткой. Измерения производились в среднем канале решетки. Рассматривалось распределение параметров как вдоль шага (координата $\bar{x}$), так и в осевом направлении (координата $\bar{z}$). $\bar{x}$ и $\bar{z}$ соответственно равны:

$$\bar{x} = \frac{x}{t}, \tag{2}$$

$$\bar{z} = \frac{z}{b}, \tag{3}$$

где $x$ – координата вдоль шага; $t$ – шаг решетки; $z$ – расстояние от выходной кромки в осевом направлении; $b$ - хорда лопатки.

Для всех рассматриваемых каналов созданы расчетные сетки, построенные в сеточном генераторе ICEM CFD, которые используются для проведения численного моделирования.

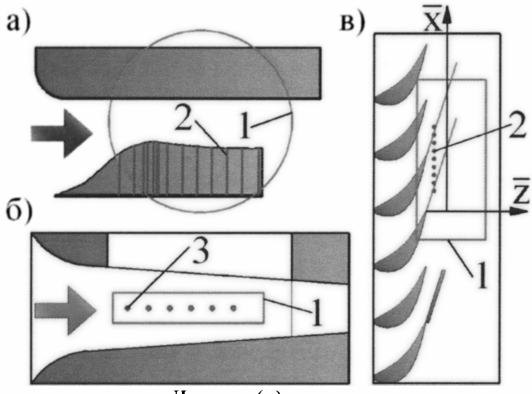


Рис. 2. Несимметричное сопло Лаваля (а), суживающееся сопло (б), плоская сопловая решетка (в). 1 – область исследований; 2 – дренажи статического давления; 3 – отверстия для зонда инерционного осаждения капель

**В третьей главе** описана экспериментально-расчетная методика бесконтактного определения средних размеров крупных капель. Подход по определению диаметров частиц дискретной фазы заключается в расчете характерных траекторий движения капель (на основе осредненных полей скоростей, полученных с помощью системы «ПОЛИС») и определении вдоль них основных параметров жидкой (скорости и ускорения, полученных экспериментально с помощью системы «ПОЛИС») и паровой (плотность,

скорость, динамическая вязкость, число Маха) фаз. Эти данные используются для определения средних размеров капель вдоль их траекторий.

Основные допущения, используемые при разработке методики:

1. Предполагается, что капли имеют сферическую форму.

2. Предполагается, что из всех сил, действующих на каплю, наибольшее влияние на характер ее движения оказывает сила аэродинамического сопротивления, воздействующая со стороны основного потока.

3. Предполагается, что величина аэродинамического сопротивления сферической частицы остается постоянной при изменении рассогласования между направлением движения основного потока и капли.

4. Предполагается, что обратное механическое воздействие капель (особенно крупных) на паровой поток минимально и им можно пренебречь.

На основе сделанных предположений средний диаметр капли в каждой точке ее траектории определяется из решения уравнения движения:

$$m_{\text{к}}\overrightarrow{a_{\text{к}}} = \frac{1}{2}\text{A}_{\text{к}}C_x\rho_{\text{п}}|\overrightarrow{c_{\text{п}}} - \overrightarrow{c_{\text{к}}}|(\overrightarrow{c_{\text{п}}} - \overrightarrow{c_{\text{к}}}). \quad (4)$$

Здесь $m_{\text{к}}$ - масса капли; $a_{\text{к}}$ - ускорение капли; $\text{A}_{\text{к}}$- площадь поперечного сечения капли (в плоскости, нормальной к направлению движения газа); $C_x$- коэффициент аэродинамического сопротивления капли; $c_{\text{п}}$- скорость паровой фазы; $c_{\text{к}}$ - скорость жидкой фазы. При расчете величины коэффициента аэродинамического сопротивления учитывалось влияние режима обтекания капли (число Re) и сжимаемости сплошной среды (число M).

Рассчитанная траектория является дискретным набором элементарных отрезков (разрешающая способность получаемых снимков позволяет добиваться разбиения траектории на отрезки длиной 0,5 – 1 мм). При расчете ускорения капель вдоль их траекторий предполагается, что на отдельном малом отрезке скорость изменяется линейно, то есть ускорение постоянно.

Система лазерной диагностики «ПОЛИС» была адаптирована для использования в условиях полидисперсных влажнопаровых потоков. Выявлено, что наличие светонепроницаемой водяной пленки на поверхности оптического стекла, интерференция лазерного ножа, засветка крупных капель приводит к некорректному определению векторов скорости частиц жидкой фазы. Для решения этой проблемы был реализован эффективный механизм пост-обработки данных о скоростях жидкой фазы, который позволил повысить качество получаемых данных и снизить экспериментальный шум.

Основной задачей применения CFD кода в работе было получение достоверных данных только о параметрах паровой среды. Сравнение распределений профильных потерь кинетической энергии вдоль шага решетки, рассчитанных с помощью CFD кода Fluent и определенных экспериментально, показало, что моделирование течения влажнопарового потока в условиях, формируемых экспериментальным стендом, сопровождается существенной погрешностью. Причинами наблюдаемого рассогласования можно считать в первую очередь отсутствие математического описания крупнодисперсной влаги, а также формирования, движения и срыва с поверхности лопатки водяной пленки. Кроме того проявляется погрешность в определении

некоторых параметров паровой среды, которые необходимы для корректного сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

Отсутствие водяной пленки на поверхностях лопаток компенсировалось выбором модели турбулентности Standard k-ε, которая рассчитывает полностью турбулентный пограничный слой в пристеночной области, что приводит к получению завышенных потерь кинетической энергии за лопаткой. Тем самым компенсировалось наличие водяной пленки на поверхности профилей. Для обеспечения возможности расчета неравновесных процессов конденсации, данная модель была модифицирована – изменено уравнение расчета турбулентной вязкости.

Погрешность в определении некоторых параметров паровой среды была исправлена путем замены встроенных в CFD код Ansys Fluent уравнений свойств воды и водяного пара на уравнения, рекомендованные Международной Ассоциацией по Свойствам Воды и Водяного Пара.

Верификация с экспериментальными данными CFD кода Ansys Fluent 14 и его модифицированных компонентов проведена для несимметричного плоского сопла Лаваля и плоской сопловой решетки.

В сопле Лаваля на стенде КВП-2 создавались режимы с незначительным перегревом пара выше температуры насыщения ($\Delta T_0 = 5K$) на входе. При этом рассматривались как расчетный, так и нерасчетные (с наличием в сверхзвуковой части канала скачков уплотнения) режимы течения. На реализуемых параметрах потока в сверхзвуковой области имеет место релаксационный процесс перехода из неравновесного в равновесное состояние пара, выраженный скачком конденсации. Волновая структура сверхзвукового потока визуально фиксировалась с помощью теневого прибора ИАБ-451 и сравнивалась с результатами численного моделирования (Рис. 3). Расчетные данные довольно точно отображают наблюдаемую структуру потока. Сравнение распределений давления на профилированной вставке сопла также позволило говорить о корректности результатов моделирования.

Для верификации математической модели влажного пара, производилось экспериментальное исследование течения за плоской изолированной сопловой решеткой. В рамках работы производилось сравнение интегральных коэффициентов потерь кинетической энергии, полученных экспериментально и численным методом. На расстоянии 10% хорды лопатки от выходной кромки вдоль шага решетки посередине высоты лопатки осуществлялось траверсирование потока пара зондом полного торможения, а также измерялось статическое давление. Рассматривалось течение влажно парового потока при различных начальных значениях влажности и теоретического числа 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 $y_0$ = 3% максимальное абсолютное значение рассогласования в расчетных и экспериментальных данных составляет порядка 1,5 %. С ростом начальной

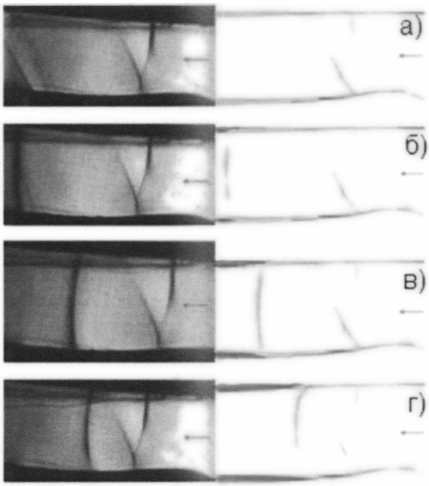


Рис. 3. Теневые фотографии (слева) и соответствующие им расчетные картины течения (справа) на различных режимах при начальном перегреве выше температуры насыщения $\Delta T0$ = 5К. а: $\varepsilon_a$ = 0,38; б: $\varepsilon_a$ = 0,51; в: $\varepsilon_a$ = 0,63; г: $\varepsilon_a$ = 0,66

влажности отличия в результатах моделирования и пневмометрических измерений снижается и при $y_0$ = 10% они практически отсутствуют.

В целях получения корректных данных только о паровой фазе, отсутствие учета в CFD коде крупных капель и водяной пленки можно компенсировать корректным выбором модели турбулентности.

Разработанная расчетно-экспериментальная методика бесконтактного измерения размеров капель с помощью системы лазерной диагностики верифицировалась в суживающемся сопле. На данный момент применение PIV алгоритма позволяет определять средние по концентрации размеры капель. Результаты измерений сравнивались с данными, полученными с помощью зонда инерционного осаждения. Рассматривалось изменение средних размеров капель вдоль канала (см. Рис. 2, б). По мере движения вдоль канала, диаметры 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 подхода по определению размеров капель (Рис. 4).

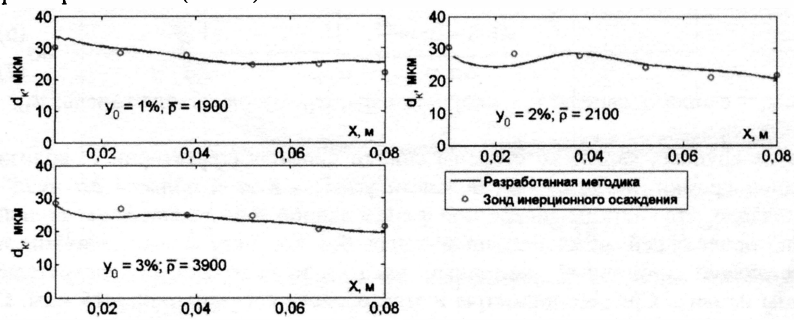


Рис. 4. Распределение средних размеров капель вдоль сопла

**В четвертой главе** рассматриваются особенности движения крупнодисперсной влаги за изолированной сопловой решеткой. 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:

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_в}{\rho_п}. \quad (5)$$

где $\rho_в$- плотность жидкой фазы перед исследуемым объектом; $\rho_п$ - плотность паровой фазы перед исследуемым объектом.

Источники крупных капель наблюдались как на фотографиях, полученных с помощью системы «ПОЛИС», так и на распределениях коэффициентов скольжения капель вдоль шага решетки. Было выявлено 3 потока крупнодисперсной влаги за решеткой:

- Капельный поток в кромочном следе.
- Капельный поток в области со стороны спинки лопатки.
- Капельный поток со стороны вогнутой поверхности.

Первые два источника крупнодисперсной влаги проявляются при всех рассматриваемых значениях начальной влажности пара, а последний наблюдался при $y_0$ = 8,4%.

Основываясь на экспериментально определенных векторных полях скоростей жидкой фазы, были рассчитаны характерные траектории движения крупных капель за решеткой (Рис. 5). Они имеют криволинейную форму и направлены в сторону уменьшения угла выхода капель; при этом с увеличением начальной влажности пара угол выхода частиц дискретной фазы увеличивается. Траектория 1 соответствует потоку капель со стороны спинки лопатки, 3 – кромочному капельному следу, 4 – потоку со стороны вогнутой поверхности.

Вдоль рассматриваемых траекторий были определены основные параметры капель: коэффициенты скольжения (ν), углы отклонения капель от направления парового потока ($\Delta\alpha$), средние диаметры (d). Величины ν и $\Delta\alpha$ определяются соответственно как:

$$\nu = \frac{c_к}{c_п}, \quad (6)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{1к} - \alpha_{1п}, \quad (7)$$

где $c_к$ - скорость капель; $c_п$ - скорость пара; $\alpha_{1к}$ - угол выхода капель; $\alpha_{1п}$ - угол выхода пара.

Поток крупных капель со стороны спинки профиля (траектории 1) вблизи выходной кромки движется под большим углом - в этой области $\Delta\alpha$ = 25°. Установлено, что частицы дискретной фазы в данной зоне являются первичной влагой, проходящей межлопаточный канал без контакта с его стенками и пересекающей кромочный капельный след, или выбивающей дискретные частицы из него. Средние диаметры в этой области составили 10 – 15 мкм. С увеличением начальной влажности от 3,4% до 8,4% основные параметры капель практически не изменяются.

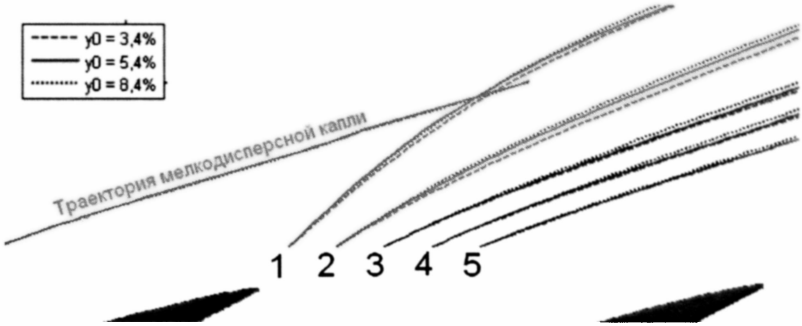


Рис. 5. Траектории крупных капель за решеткой при различной начальной влажности

Исследования показали, что в кромочном следе (траектория 3) на начальном участке движения ($z < 0{,}12b$) имеет место активное дробление частиц жидкой фазы – средние размеры капель уменьшаются (Рис. 6). После выравнивания дисперсного состава на участке $0{,}12b < z < 0{,}22b$ начинается рост средних диаметров, что свидетельствует о начале коагуляционных процессов. По мере удаления от выходной кромки лопатки скорости капель непрерывно увеличиваются – коэффициенты скольжения растут от 0,5 – 0,55 при $z = 0{,}05b$ до 0,69 – 0,74 при $z = 0{,}26b$. С изменением начальной влажности от 3,4% до 8,4% диаметры частиц вблизи выходной кромки растут от 85 мкм до 115 мкм. Это связано с ростом расхода в водяной пленке, формируемой на стенках лопатки.

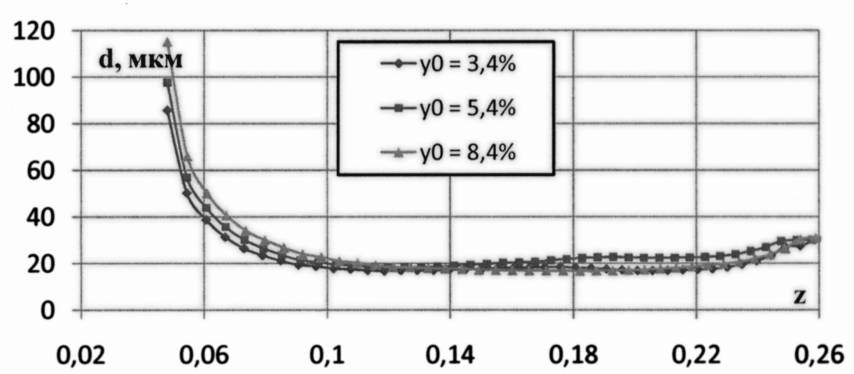


Рис. 6. Распределение средних по концентрации размеров капель вдоль траектории 3

Установлено, что дисперсный состав дискретной среды в кромочном следе существенно зависит от начальной влажности пара. По мере удаления от выходной кромки, при начальной влажности $y_0$ = 3,4% увеличивается

концентрация мелкодисперсной влаги, в то время как при $y_0$ = 8,4% наблюдается рост концентрации крупных капель.

Поток крупных капель со стороны вогнутой поверхности (траектория 4) явно проявляется только при начальной влажности $y_0$ = 8,4%. Его появление связано с интенсификацией процессов отражения и выбивания капель с поверхности водяной пленки, движущейся вдоль вогнутой поверхности лопатки. При этом средние диаметры капель увеличиваются от 10 мкм до 15 мкм.

Исследования показали, что изменение параметра $\overline{\rho}$ существенно влияет на характер движения частиц жидкой фазы за сопловой решеткой. Это связано с изменением аэродинамического воздействия на капли со стороны основного потока (так как изменение $\overline{\rho}$ в первую очередь приводит к изменению плотности парового потока).

Установлено, что увеличение плотности паровой среды (уменьшение $\overline{\rho}$) приводит к вырождению потока крупных капель со стороны спинки лопатки. Это четко проявляется на распределениях коэффициентов скольжения за решеткой (Рис. 7) – в рассматриваемой зоне при $\overline{\rho}$ = 1994 величина ν близка к 1, что говорит о движении капель преимущественно малых размеров. Кроме того, уменьшение $\overline{\rho}$ (увеличение плотности парового потока) приводит к уменьшению углов выхода частиц жидкой фазы.

Наблюдается существенное перестроение скоростей и размеров капель в кромочном следе (Рис. 8). Уменьшение $\overline{\rho}$ приводит к снижению коэффициентов скольжения непосредственно вблизи выходной кромки (z = 0,05b). При этом, если при максимальном значении $\overline{\rho}$ = 3790 величина коэффициента скольжения практически не изменяется по мере удаления частиц жидкой фазы от сопловой решетки, то при $\overline{\rho}$ = 2581 и $\overline{\rho}$ = 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 $\overline{\rho}$ = 2581 и $\overline{\rho}$ = 1994 средние по концентрации размеры капель в области установившегося

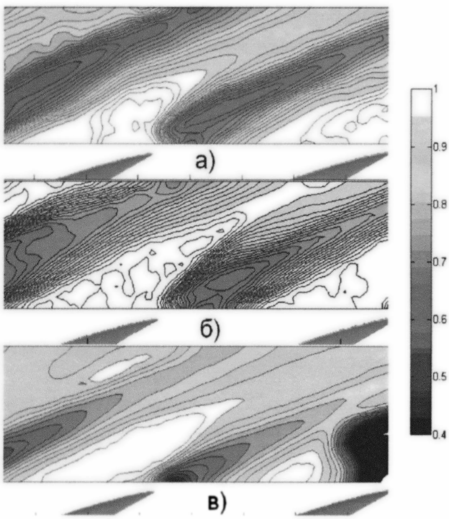


Рис. 7. Распределение средних коэффициентов скольжения за сопловой решеткой при начальной влажности пара $y_0$ = 3,4%. а: $\overline{\rho}$= 3790; б: $\overline{\rho}$= 2581; в: $\overline{\rho}$= 1994

дисперсного состава (z = 0,11b - 0,19b) в два раза меньше, чем при $\overline{\rho} = 3790$.

На основе проведенных исследований были получены обобщенные характеристики жидкой фазы в кромочном следе за сопловой решеткой (см. рисунок 9). На рисунке $\overline{\gamma} = d/d_0$, где $d_0$ - средний размер капель перед каналом.

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 оптимальное значение межосевого зазора ступени с точки зрения скоростей, углов движения и размеров капель.
3. Оптимизировать мероприятия по борьбе с крупнодисперсной влагой в потоке. Выбрать оптимальные параметры работы систем сепарации пленки и вдува греющего пара путем сравнивания характеристик движения капель за решеткой.
4. Полученные параметры движения крупнодисперсной влаги могут быть использованы как исходные данные для анализа активности эрозионного износа рабочих лопаток: определение степени разрушения материала в зависимости от времени работы машины, напряжения в металле при соударении капли с поверхностью лопатки и так далее.

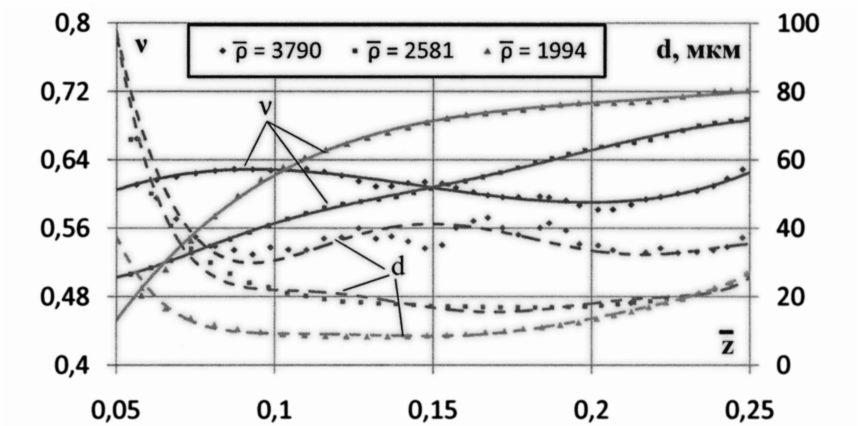


Рис. 8. Распределение коэффициентов скольжения и размеров капель вдоль траектории, расположенной в кромочном капельном следе при $y_0$ = 8,4%

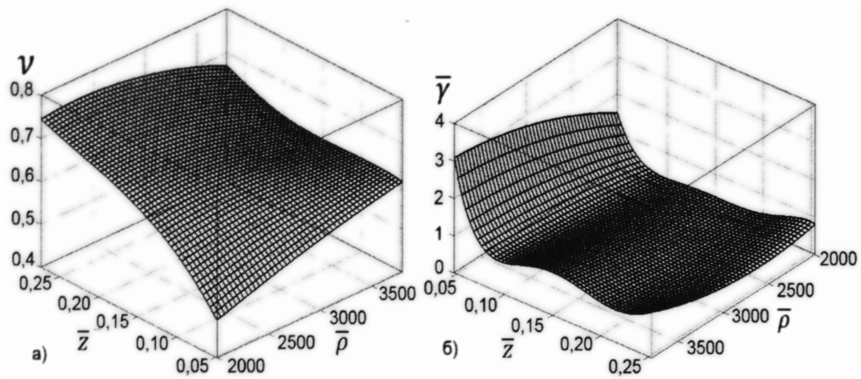


Рис. 9. Распределение коэффициентов скольжения (а) и средних размеров (б) жидкой фазы в кромочном следе за сопловой решеткой при начальной влажности $y_0 = 3{,}4\%$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И 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 $\overline{\rho}$ = 2581 не приводит к существенным изменениям ν, $\alpha_к$, $d_к$ капель, движущихся со стороны спинки лопатки.

5.2 С увеличением начальной влажности до $y_0$ = 8,4% при $\overline{\rho}$ = 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 $\overline{\rho}$ = 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 $\overline{\rho}$ 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработка методики применения лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсных влажнопаровых потоков / В.А. Тищенко [и др.] // Известие РАН. Энергетика. 2010. № 6. С. 11 – 20.

2. Особенности образования жидкой фазы и формирования структуры потока пара в сопловой решетке / В.А. Тищенко [и др.] // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 24 – 29.

3. Экспериментальное исследование влияния начальной влажности на распределение параметров эрозионно-опасной жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой / В.А. Тищенко [и др.] // Вестник МЭИ. 2013. №1. С. 55 – 61.
4. Experimental studies of polydispersed wet steam flows in a turbine blade cascade / V. Tischenko [и др.] // Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. V. 228. № 2. P. 168-177.
5. Исследование структуры влажно-парового потока в элементах проточных частей турбомашин / В.А. Тищенко [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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Экспериментальное исследование течения полидисперсного влажнопарового потока за сопловой решеткой турбины / В.А. Тищенко [и др.] // III конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силовые машины»: Тез. докл. конф. Санкт-Петербург. 2012. С. 28 – 29.
10. Experimental studies of wet-steam polydisperse flows in turbine blade cascades / V. Tishchenko // Baumann Centenary Conference: Тез. докл. международной конф. Cambridge. 2012. 1 CD.
11. Technique development of application of laser diagnostics to investigate the characteristic of moist-steam polydisperse flows / V. Tishchenko [и др.] // 9th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow: Тез. докл. международной конф. Pilsen. 2010. С. 23-27.