

На правах рукописи



Гаврилов Илья Юрьевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПАРА НА
ВОЛНОВУЮ СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА
В СОПЛОВОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКЕ**

Специальность 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные
турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" на кафедре паровых и газовых турбин.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Грибин Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Хоменок Леонид Арсеньевич,
заместитель генерального директора по научной
работе ОАО «НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова»,
г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук Безухов Андрей Павлович,
Доцент кафедры «Машин и оборудования
энерготехнических комплексов», институт
машиностроения «ЛМЗ-ВТУЗ» ФГБОУ ВПО
СПбГПУ

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового
Красного Знамени Теплотехнический научно-
исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») г.
Москва

Защита состоится «24» июня 2014г. в 16 час. на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 на базе ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 118

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и на сайте ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « » 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.06., к.т.н., доцент



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение эффективности проточных частей паровых турбин, работающих на влажном паре, является важным направлением развития турбостроения. Опыт эксплуатации паровых турбин ТЭС и АЭС показывает, что именно в этих областях наблюдается рост аэродинамических потерь энергии, эрозия и увеличение аварийности лопаточного аппарата.

Эти явления обусловлены фазовыми переходами, спонтанной конденсацией, образованием в потоке крупнодисперсных – эрозионно опасных капель влаги. Увеличение скорости паровой фазы до трансзвуковых и сверхзвуковых значений приводит к появлению волновой структуры, которая в зоне фазового перехода взаимодействует со скачками конденсации, что приводит к появлению дополнительных возмущающих сил, которые в настоящее время, изучены недостаточно.

Переход к цилиндрам низкого давления повышенной пропускной способности, связанный с разработкой выхлопного отсека с рабочими лопатками предельной длины, приводит к значительному увеличению скоростей потока и усилению отрицательного воздействия жидкой фазы на показания экономичности и надежности.

В настоящий момент разрабатываются профили нового поколения, которые позволят увеличить эффективность и надежность лопаточного аппарата. Кроме этого ведется работа по совершенствованию и созданию новых активных и пассивных способов снижения эрозионного износа лопаточного аппарата.

Для создания профилей и разработки и применения активных способов по снижению эрозионного износа необходимо проведение экспериментальных исследований газодинамики двухфазных сред с применением современных методов диагностики движения крупнодисперсной влаги, определением динамических характеристик во влажнопаровом потоке, возникающих на трансзвуковых и сверхзвуковых режимах.

Одной из основных задач является разработка методики определения характеристик полидисперсных двухфазных потоков в решетках турбомашин и определение влияния начального состояния пара на волновую структуру и амплитудно-частотные характеристики потока в решетках турбомашин. Результаты этих исследований необходимы для изучения физических процессов, более обоснованного проектирования элементов проточных частей паровых турбин, а также разработки и верификации расчетных моделей в газодинамике двухфазных сред.

Цель работы:

Экспериментальное изучение с применением методов лазерной диагностики влияния изменения начальных параметров пара и срабатываемого теплоперепада в сопловой турбинной решетке на параметры движения частиц жидкой фазы, динамические характеристики и структуру потока.

Задачи исследования:

1. Разработка методики применения методов лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсного влажнопарового потока в решетках турбомашин.

2. Исследовать процессы возникновения и движения жидкой фазы за сопловой решеткой.

3. Определение характеристик жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой в широком диапазоне режимных параметров.

4. Определить влияние начального состояния пара на волновую структуру потока на около- и сверхзвуковых режимах течения.

5. Определить влияние начального состояния на амплитудно-частотные характеристики основного потока в сопловой решетке.

Научная новизна

- Разработана методика применения системы лазерной диагностики, основанной на PIV алгоритме, для измерения параметров жидкой фазы в полидисперсном влажнопаровом потоке.

- На основании применения методов лазерной диагностики впервые получены данные экспериментов для различных начальных состояний пара по параметрам движения капель, полям скоростей жидкой фазы за сопловой плоской турбинной решеткой в широком диапазоне режимных параметров.

- Экспериментальные данные по влиянию начального состояния и скорости пара на волновую структуру и пульсации статического давления за сопловой решеткой

- На основании анализа результатов экспериментов установлено, что:

1. Взаимодействие скачка конденсации с адиабатическим скачком, расположенным ниже по потоку, приводит к возникновению периодически нестационарного течения.

2. Процесс взаимодействия скачков сопровождается появлением дополнительных гармоник пульсаций статического давления. Динамический уровень пульсаций возрастает в области взаимодействия скачков конденсации и уплотнения.

3. Показано, что на трансзвуковых режимах при неизменных начальных условиях появляются низкочастотные пульсации статического давления

в минимальном сечении сопловой решетки, приводящие к изменению расхода.

Практическая ценность

- Разработанная и апробированная методика применения системы лазерной диагностики расширяет возможности проведения испытаний проточных частей паровых турбин ТЭС и АЭС

- Полученные данные по влиянию начального состояния пара на волновую структуру и параметры двухфазного потока в сопловой решетке могут быть применены как исходные для проектирования ступени, выборе осевого зазора между сопловой и рабочей решетками, оценки эффективности системы влагоудаления, разработки методики определения эрозионного износа.

- Полученные результаты эксперимента позволяют уточнить методики и программы расчета движения двухфазного потока необходимые для проектирования ступеней паровых турбин.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается в ранее исследованных диапазонах параметров корреляцией с результатами других исследователей, применением современных аттестованных измерительных устройств и апробированных методик измерений, сопоставлением результатов экспериментов, полученных с применением различных методик.

Автор защищает.

1. Методику применения лазерной диагностики, на основе PIV алгоритмов, для исследования полидисперсного влажнопарового потока в элементах проточных частей турбомашин.

2. Результаты экспериментальных исследований характеристик жидкой фазы и структуры влажнопарового потока в широком диапазоне режимных параметров.

3. Результаты измерений пульсаций давлений и волновой структуры потока в плоском пакете сопловых лопаток в зависимости от начального состояния пара.

Апробация работы.

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

- международные научно-технические конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», НИУ МЭИ, 2009-2013 гг.;

- 9th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow. ES 2010;

- 3-я конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ». Санкт-Петербург, 2012 г;

- Baumann Centenary Wet Steam Conference. Cambridge, 2012;

- научный газодинамический семинар кафедры Паровых и газовых турбин, ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» (Москва, 2013);

- заседание кафедры Паровых и газовых турбин, ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» (Москва, 2013);

- заседание кафедры «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» (С.-Петербург, 2014).

Публикации.

По результатам диссертационной работы было опубликовано 4 научных статьи и 8 докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы, изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 108 рисунков, 1 таблицу и библиографию из 85 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы исследования течения влажного пара вследствие возникновения возмущающих сил при изменении начального состояния, эрозии лопаточного аппарата во влажном паре и дополнительных потерь от влажности.

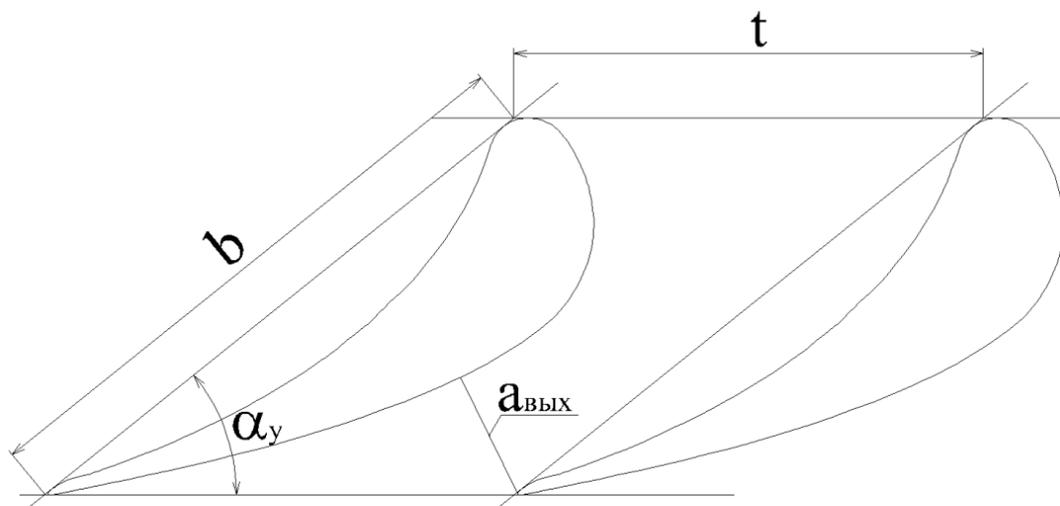
В первой главе проведен обзор литературы по тематике течения пара при различных начальных состояниях от перегретого до влажного в элементах проточных частей турбомашин. Представлены данные различных авторов по влиянию начального состояния и скорости течения на волновую структуру в сопловой турбинной решетке. Рассмотрены характерные зоны влагообразования полученные как экспериментально, так и расчетным путем различными авторами. Произведен анализ методов исследования характеристик жидкой фазы и результатов экспериментальных исследований, имеющих на данный момент в этой области. В итоге обзора литературы сформулированы цели и поставлены задачи работы.

Во второй главе приводится описание экспериментального стенда КВП – 2 (контур влажного пара) кафедры паровых и газовых турбин НИУ МЭИ. Рабочим телом которого является перегретый пар, поступающий на стенд из отбора турбины ТЭЦ МЭИ. Трехступенчатая система увлажнения позволяет изменять начальное состояние от перегретого до влажного пара. В 2007 году была произведена глубокая модернизация стенда с заменой трубопроводов, арматуры, штатных систем измерения.

В работе объектом исследования был выбран плоский пакет из 6 сопловых лопаток с профилем типа С-9015А (рисунок 1, а), установленный в рабочую часть

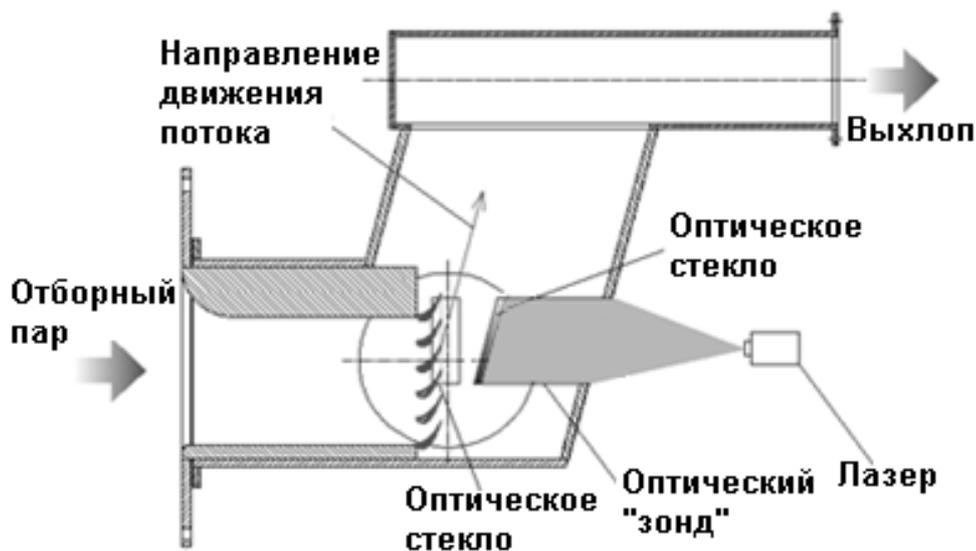
(рисунок 1, б). Данная рабочая часть была специально подготовлена для использования оптических методов.

Для измерения таких параметров потока, как пульсации давления в канале и температуры полного торможения перед исследуемым объектом используется система пневмометрических измерений МПС-300М.



B	b	$\Delta_{кр}$	$\bar{\Delta}_{кр}$	t	\bar{t}	$a_{вых}$	α_y	$\alpha_{эф}$	l
мм	мм	мм		мм		мм	град	град	мм
31.3	52	1	0.1	38	0.73	10	37	15	48

а)



б)

Рисунок 1. Геометрические характеристики плоской решетки (а) установленной в рабочую часть (б)

Для измерения абсолютного давления (постоянной и переменной составляющей) потока в исследуемом объекте использовались пьезорезистивные датчики ХТЕЛ-140М-1,7. Для исследования пульсаций статического давления в косом срезе решетки заподлицо с бандажной пластиной установлено 5 датчиков (рисунок 2).

Для исследования волновой структуры потока использовался прибор теневой автоколлимационный ИАБ-451. Регистрация изображения производилась цифровой камерой ВИДЕОСКАН-285-2001.

Характеристики жидкой фазы определялись с помощью системы лазерной диагностики «Полис» для измерения мгновенных полей скоростей, построенной на основе метода PIV. Основными элементами системы являются сдвоенный импульсный лазер, цифровая камера, координатное устройство и синхронизатор.

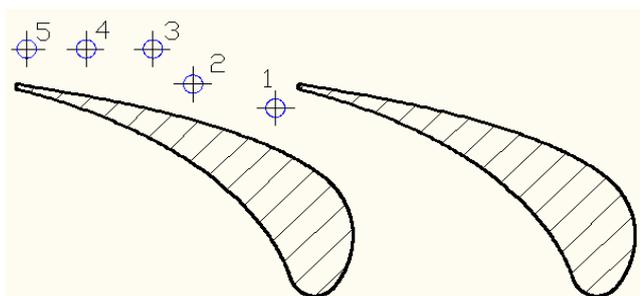


Рисунок 2. Схема расположения датчиков абсолютного давления

Измерение мгновенного поля скоростей капельного потока в заданном сечении основано на измерении перемещения капель, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. Измерительной областью потока (рисунок 3) считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Капли в измерительной плоскости потока должны быть

освещены минимум дважды. Образы капель регистрируются на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости.

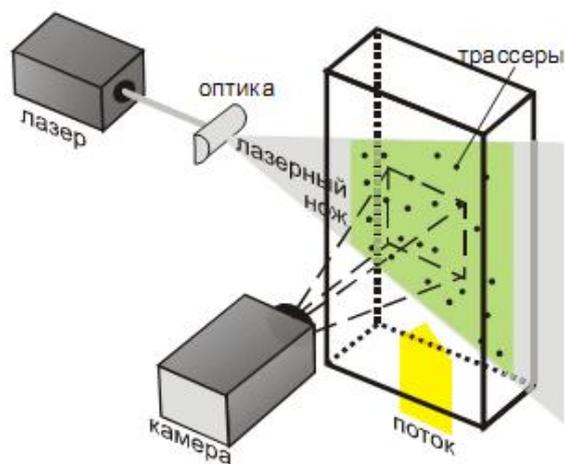


Рисунок 3. Схема метода

Характеристики основного потока определялись расчетным путем. Представленные результаты расчетов обтекания плоских решеток выполнены в стационарной двумерной постановке. Для расчётов течения влажного пара в межлопаточном канале используется программный комплекс Fluent со встроенной в нем математической моделью влажного пара (Wet – steam model). Для работы модели влажного пара в плоском пакете сопловых лопаток была разработана и

верифицирована методика построения сеток и проведения расчета.

В третьей главе на основе анализа мгновенных снимков влажнопарового потока, полученных методом лазерной диагностики, рассмотрены характерные особенности образования жидкой фазы и формирования структуры двухфазного

потока пара в сопловой решетке. Путем обработки сдвоенных фотографий PIV алгоритмом и набором статистики из 600 серий получены осредненные поля скоростей жидкой фазы, и произведена их обработка. В программном комплексе Fluent рассчитаны траектории движения капель и моделируется процесс образования водяных пленок на поверхности лопаток.

Визуальный анализ мгновенных снимков течения двухфазной среды в канале сопловой решетки выполнен для различных начальных состояний пара, лежащих в диапазоне от перегрева на $\Delta T_0 = T_0 - T_s = 18\text{K}$ (T_0 – температура полного торможения на входе; T_s – температура насыщения при давлении полного торможения p_0 на входе) до начальной влажности $y_0 = 6\%$ и при значениях теоретического числа Маха $M_{1T} = 0,8 - 1,3$. На каждом режиме для постоянного значения M_{1T} проводилась непрерывная съемка при уменьшении ΔT_0 и фиксировалось значение ΔT_0 в первый момент появления капель, засвеченных в исследованной части на выходе из решетки. Цепочка капель, зафиксированная на фотографиях, наблюдалась с вогнутой поверхности профиля. Однако капли в этой области фиксировались не на всех снимках, то есть интенсивность процесса влагообразования на перегретом паре с вогнутой поверхности профиля имеет неустановившийся во времени характер.

При состоянии насыщения во входном сечении решетки на фотографиях хорошо виден капельный след и область схода влаги с поверхности профиля (рисунок 4). На некотором расстоянии от выходной кромки наблюдается ярко выраженная волнообразная структура капельного следа. Капли срываются с вогнутой поверхности дискретными образованиями, расстояние между которыми увеличивается вследствие роста скорости вдоль следа. В результате проведенного эксперимента на плоской пластине можно говорить, что волнообразная структура капельного следа связана с воздействием вихрей на поток капель, которые, «разгоняя» капли вокруг себя, формируют волнообразную структуру.

При начальной влажности пара перед каналом $y_0 > 0\%$ превалирующим процессом генерации крупнодисперсной влаги является явление срыва развитой водяной пленки, образованной оседанием на стенках и отражением крупных капель в межлопаточном канале. В результате максимальная концентрация крупных капель имеет место в капельном следе. На сверхзвуковом режиме угол наклона капельного следа изменяется во времени. Изменения угла наклона и формы следа связаны с пульсациями статического давления. Скачки уплотнения и конденсации взаимодействуют с пограничным слоем, перемещаются в косом срезе, при этом изменяется их интенсивность и изменяются характеристики движения жидкой фазы.

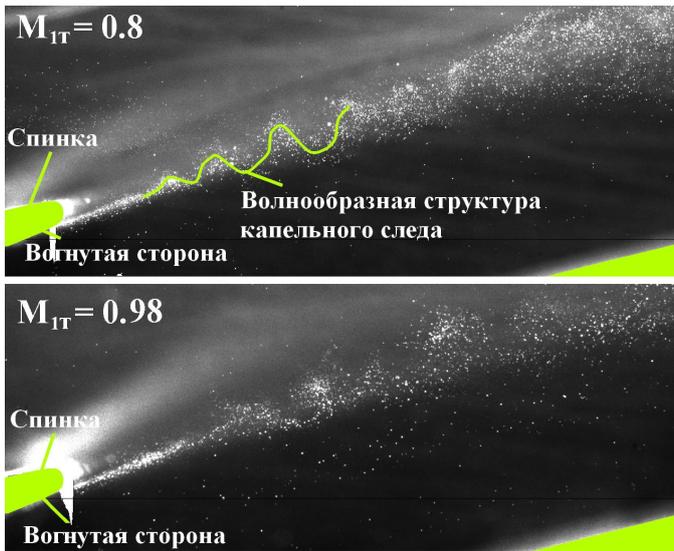


Рисунок 4. Структура капельного потока за фронтом решётки при состоянии насыщения на входе

ядре потока траектории капель совпадают на всех начальных влажностях (линии 3-7), что говорит о том, что их размер в данной области практически не изменяется, и они не представляют опасности с точки зрения эрозионного износа рабочей лопатки.

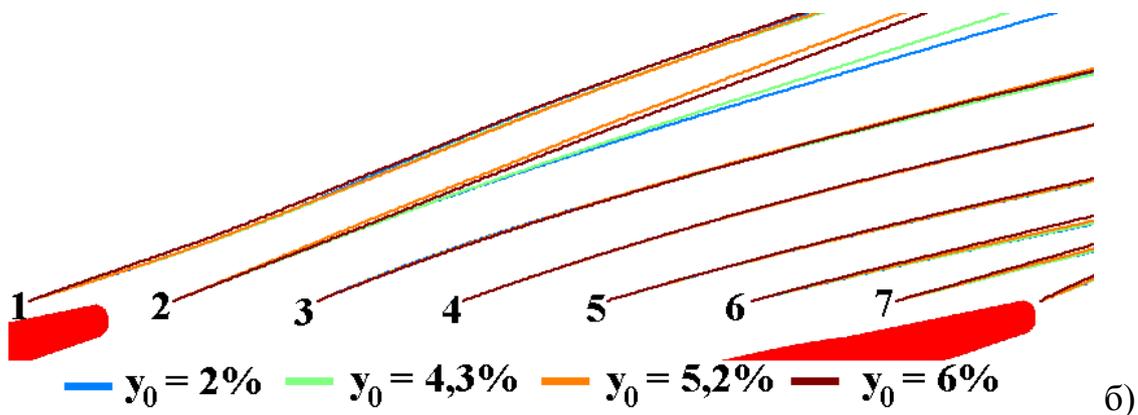
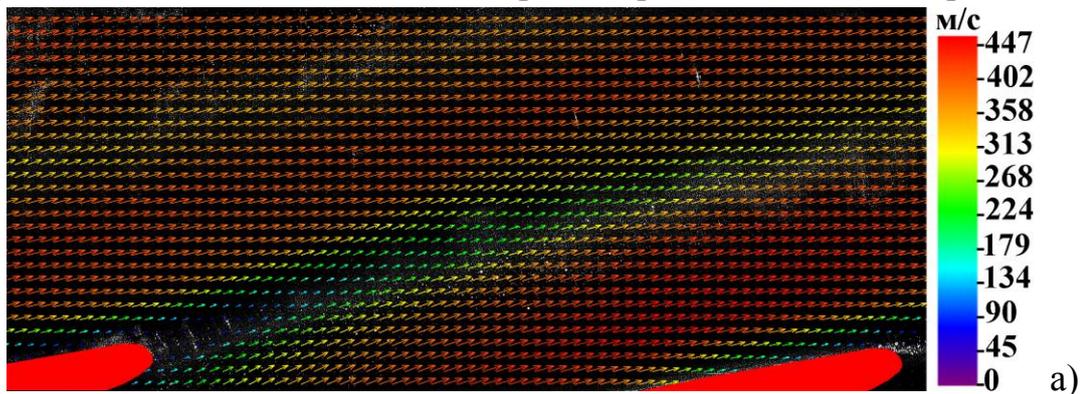


Рисунок 5. Осредненное поле скоростей жидкой фазы при $y_0 = 4,3\%$ и $M_{1T} = 0,93$ (а); траектории капель при $M_{1T} = 0,93$ при различной начальной влажности (б)

Применение PIV алгоритма позволило получить осредненное поле скоростей жидкой фазы (рисунок 5) в широком диапазоне режимных параметров $M_{1T} = 0,8; 0,93; 1,32$ с изменением начальной влажности. По полям скоростей для различных состояний пара были построены траектории движения капель (рисунок б) за сопловой решеткой.

Траектории капель с ростом влажности отклоняются в середине капельного кромочного следа (линия 2). Происходит увеличение угла выхода жидкой фазы с ростом влажности. В

ядре потока траектории капель совпадают на всех начальных влажностях (линии 3-7), что говорит о том, что их размер в данной области практически не изменяется, и они не представляют опасности с точки зрения эрозионного износа рабочей лопатки.

Рассмотрены характеристики жидкой фазы (коэффициент скольжения $\nu = c_k/c_p$, где c_p – скорость пара, c_k – скорость капли; величина рассогласования углов между фазами $\varphi = \alpha_k - \alpha_p$, α_p – угол выхода пара, α_k – угол выхода капель) на расстоянии 10% (рисунок 6, а) и 20 % (рисунок 6, б) от хорды профиля вдоль шага решетки при $M_{1T} = 0,8$, $M_{1T} = 0,93$ и $M_{1T} = 1,32$ с изменением начальной влажности.

В ядре потока коэффициент скольжения частиц жидкой фазы с изменением начального состояния остается постоянными $\nu \approx 1$, что говорит о наличии в этой области капель малых размеров ($d_k < 5$ мкм). Также минимальна величина рассогласования между углами основного потока и каплями.

Увеличение начальной влажности приводит к расширению кромочного капельного следа и дальнейшему снижению коэффициентов скольжения. При достижении определенной влажности (которая зависит от формы канала и режимных параметров) происходит расширение капельного следа, в то время как значение минимума коэффициента скольжения в нем остается практически неизменным.

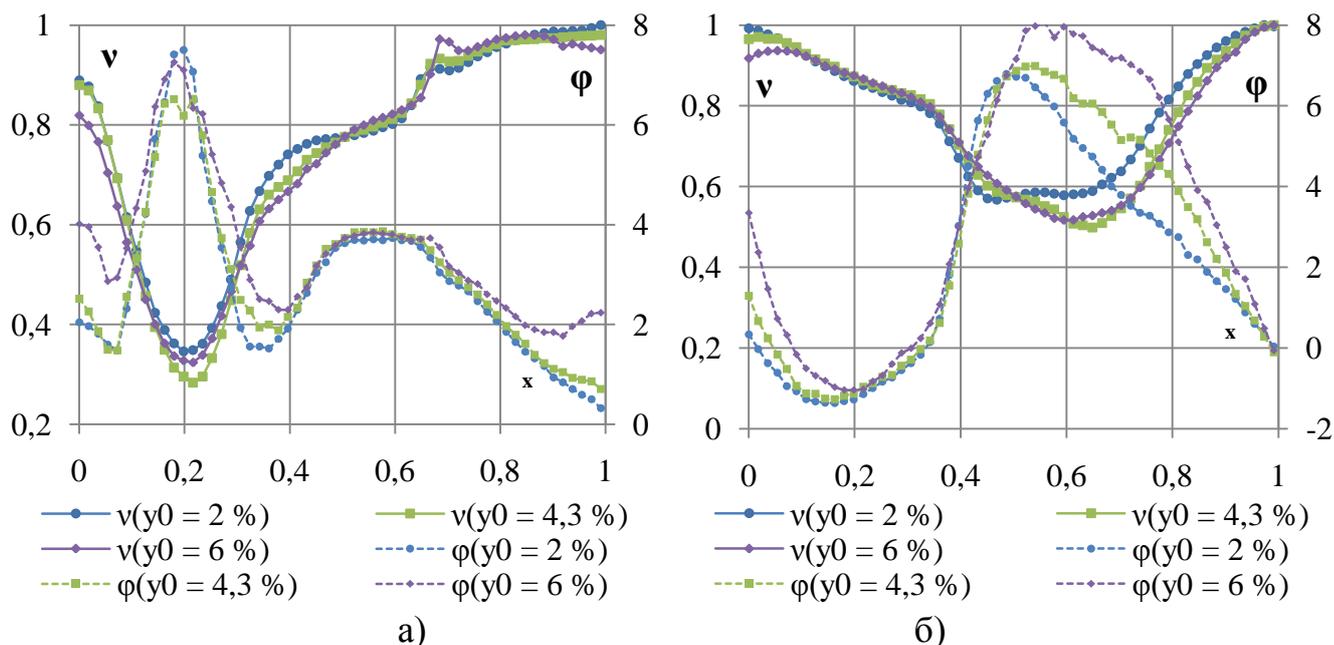


Рисунок 6. Распределение коэффициентов скольжения и величины рассогласования углов для $M_{1T} = 0,93$ на расстоянии $0,1b$ (а) и $0,2b$ (б)

Аналогичные явления происходят с величиной рассогласования углов; с ростом влажности разница в углах в кромочном капельном следе со стороны спинки увеличивается. В то же время происходит увеличение области рассогласования углов с удалением от выходной кромки.

Как показали исследования на расстоянии $0,2b$ от выходной кромки, ядро капельного потока при начальной влажности пара $y_0 \geq 0\%$ практически

отсутствует, при этом минимум коэффициента скольжения увеличивается в 2 раза по сравнению с расстоянием $0,1b$. Это связано с разгоном жидкой фазы основным потоком.

Как показал анализ полученных результатов при сверхзвуком режиме течения коэффициент скольжения значительно ниже по сравнению с дозвуковыми режимами. При удалении от выходной кромки ускорение каплей уменьшается. Данное явление может быть связано с понижением плотности основного потока и, как следствие, уменьшением коэффициента сопротивления каплей.

В четвертой главе рассматривается влияние скорости потока (чисел Маха) и начального состояния пара на волновую структуру потока в изолированной сопловой решетке. Исследования выполнены при помощи теневого автоколлимационного прибора ИАБ-451 в диапазоне чисел Маха $M_{1T}=0,9-1,7$ и начального состояния $\Delta T_0 = 0-46$ К. Получена волновая структура потока при $M_{1T} = 0,91 - 1,70$ на перегретом паре ($\Delta T_0 = 46$ К).

С повышением M_{1T} до $1,70$ волновая структура потока изменяется кардинальным образом (рисунок 7). При этой скорости потока в центрированной волне разрежения возникает скачок конденсации. Причем, в отличие от режимов с $M_{1T} = 0,91-1,50$ в результате взаимодействия скачка конденсации с адиабатическими скачками процесс расширения потока становится нестационарным.

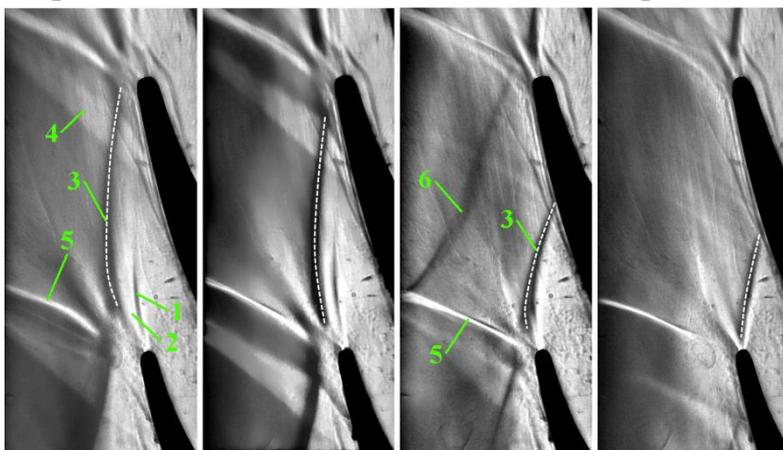


Рисунок 7. Изменение во времени волновой структуры потока в решетке при $\Delta T_0=46$ К, $M_{1T}=1,70$

1 – скачок конденсации; 2 – центрированная волна разрежения; 3 – внутренний кромочный скачок; 4 – отраженная волна разрежения; 5 – внешний кромочный скачок; 6 – отраженный скачок уплотнения

В данной главе показано изменение по времени волновой структуры потока при состоянии насыщения на входе в диапазоне $M_{1T}=1,07-1,75$. С переходом на насыщенный пар перемещения скачка уплотнения вдоль косога среза сохраняются из-за взаимодействия со скачком конденсации и пограничным слоем.

Исследование амплитудно-частотных характеристик потока в сопловой решетке проводилось в широком диапазоне начального состояния пара перед решеткой, при этом рассматривались теоретические числа Маха (M_{1T}), которые реализовывались при исследовании волновой структуры.

В результате обработки осциллограмм изменения давления в косом срезе сопловой решетки были получены распределения уровня динамических пульсаций на каждом датчике в зависимости от числа Маха M_{1T} при различных начальных параметрах пара перед исследуемым объектом. На рисунке 8, а представлено изменение динамического уровня пульсаций $\overline{p''}$ на каждом датчике при различных значениях M_{1T} и перегреве выше температуры насыщения перед решеткой $\Delta T_0=48$ К. Величина $\overline{p''}$ определялась по следующей формуле:

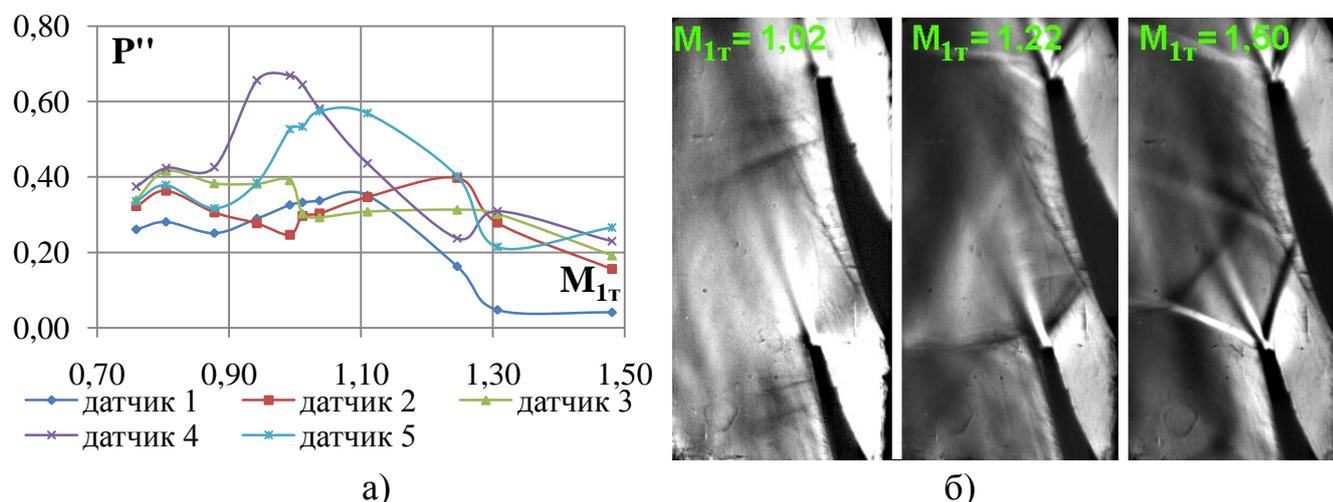
$$\overline{p''} = \frac{2 \times A}{p_0 - p_a}, \quad (1)$$

где $2xA$ – удвоенная амплитуда или размах пульсаций; p_0 – давление полного торможения перед решеткой; p_a – статическое давление за решеткой.

Максимум уровня динамических пульсаций на датчике достигается, когда колебания скачка уплотнения происходят непосредственно вблизи измеряемой точки. Данное утверждение подтверждается сопоставлением волновой структуры потока, полученной с помощью теневого метода, с распределениями динамического уровня пульсаций.

Следует отметить, что диапазон $M_{1T}=1,0-1,1$ соответствует кризису потерь первого рода для исследуемой решетки, возникающему вследствие отрыва потока на спинке профиля в системе локальных скачков уплотнения. В этом же диапазоне скоростей, существует максимум пульсаций давления. Таким образом, анализ влияния режима течения на динамические пульсации подтверждает, что изменение уровня пульсаций коррелирует с изменением волновой структуры потока при около- и сверхзвуковых скоростях (рисунок 8, б).

Распределение динамического уровня пульсаций в зависимости от числа Маха M_{1T} на датчике №1 при различном начальном перегреве пара показало, что на перегретом паре ($\Delta T_0=48, 31$ К) максимум пульсаций достигается при $M_{1T}=1,1$. В области датчика № 1 максимум пульсаций достигается при $\Delta T_0=10$ К (рисунок 9,а). Аналогичный характер изменения динамических пульсаций имеет место и в области датчика № 2. Датчик № 4 находится в районе локальной сверхзвуковой области на спинке профиля исследуемого канала. Здесь уровень пульсаций при уменьшении начального перегрева практически не изменяется (рисунок 9, б). Только на насыщенном паре происходит их резкое уменьшение и перемещение максимума в область больших значений чисел M_{1T} .



Рисунке 8. Динамический уровень пульсации по датчикам (а) и волновая структура (б) при перегреве $\Delta T_0 = 48$ К

Из анализа спектров плотности мощности (СПМ) сигнала установлено, что максимум мощности сигнала приходится на околосвуковые режимы $0,94 \leq M_{1T} \leq 1,11$, при этом реализуется строго периодический процесс. С увеличением скорости потока происходит увеличение частоты максимума сигнала. При этом мощность сигнала на датчике № 4 резко падает и при $M_{1T} = 1,25$ достигает минимума среди рассматриваемых режимов. Частота максимума сигнала возрастает, структура спектра плотности мощности становится многопиковой. С переходом на $M_{1T} = 1,31$ из-за образования системы отраженных скачков уплотнения происходит перераспределение мощности сигнала.

При переходе на насыщенный пар на входе происходит перемещение максимума мощности сигнала в область более высоких чисел $M_{1T} = 1,05$. На рассмотренных сверхзвуковых режимах, с уменьшением начального перегрева пара перед исследуемой решеткой, в области минимального сечения образуется скачок конденсации. Его появление приводит к изменению волновой структуры потока и, как следствие, перераспределению спектров плотности мощности.

Как было показано в анализе теневых фотографий для $M_{1T} = 1,7$ на перегреве $\Delta T_0 = 48$ К в определенные моменты времени возникает скачок конденсации, который приводит к значительной перестройке потока. Судя по СПМ, этот эффект проявляется на частоте 1600 Гц. Затем, когда скачок конденсации в потоке существует постоянно (при снижении перегрева), проявляется частота 1000 Гц. С появлением скачка конденсации в потоке происходит рост уровня динамических пульсаций.

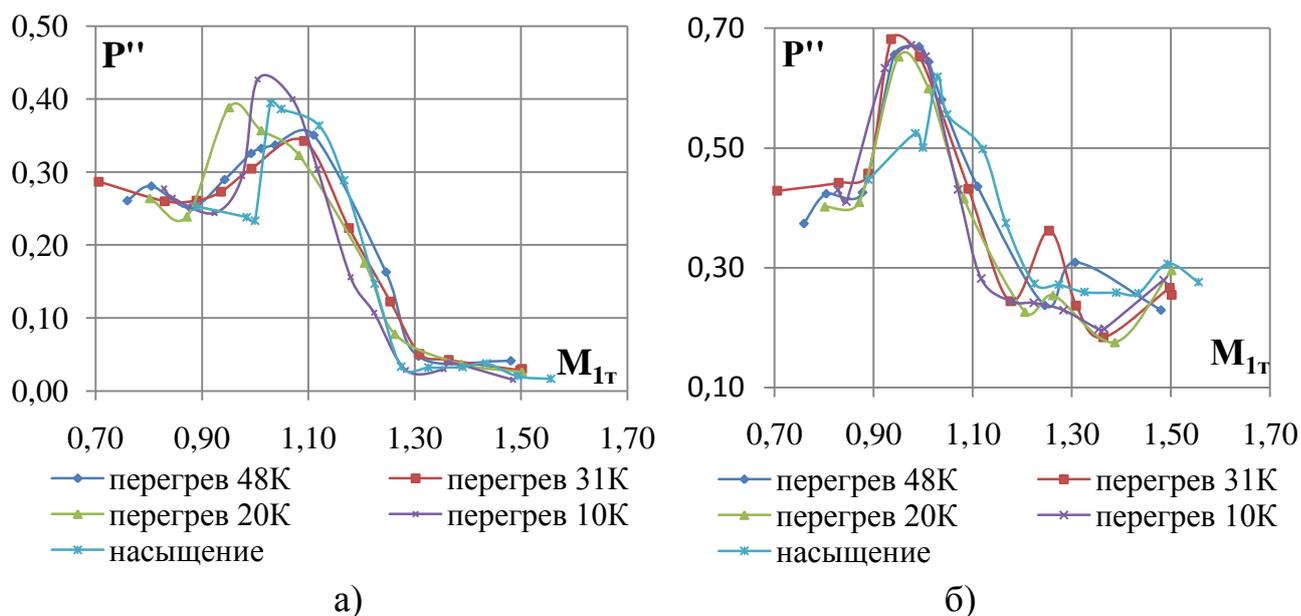


Рисунок 9. Изменение уровня динамических пульсаций на датчике № 1 (а) и № 4 (б) в зависимости от M_{1T} при различном начальном перегреве

При состоянии насыщении на входе при $M_{1T} = 1,05; 1,12$ на СПМ максимум мощности сигнала соответствует низкой частоте. Это связано с изменением расхода через решетку. Данный эффект подтверждают теневые фотографии (рис. 10), на которых видно, что происходит периодическое исчезновение внутреннего кромочного и конденсационного скачков уплотнения (поток становится дозвуковым).

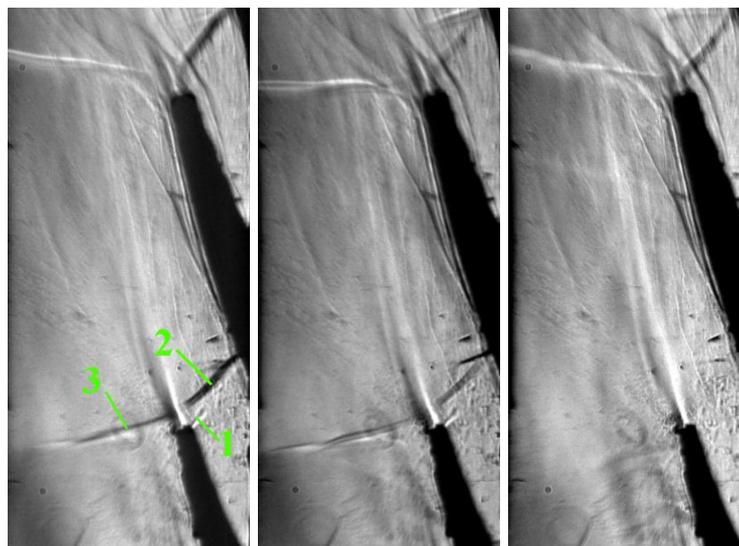


Рисунок 10. Волновая структура потока при насыщенном паре и $M_{1T} = 1,18$
 1 – скачок конденсации; 2 – внутренний кромочный скачок уплотнения; 3 – внешний кромочный скачок уплотнения

Зависимость частоты пульсаций от начального состояния при различных числах Маха, показала, что несмотря на уменьшение амплитуды перемещения скачка, частота его колебаний несколько снижается при переходе от перегрева к влажному пару.

Основные выводы

1. Разработанная методика применения лазерной диагностики потока методом PIV позволяет проводить детальное изучение полей скоростей и структуры движения жидкой фазы в турбинной решетке. Такие результаты исследования дают возможность определять закономерности образования и движения жидкой фазы, изучать влияние режимных параметров на процесс влагообразования, получать исходные данные для проектирования, анализа эффективности различных методов снижения потерь от влажности и повышения эрозионной надежности в проточных частях паровых турбин, а так же для верификации расчетных методов.

2. При проектировании ступеней и профилировании решеток паровых турбин, необходимо учитывать начальное состояние пара и срабатываемый в сопловой решетке теплоперепад, оказывающие заметное влияние на характеристики двухфазного потока за решеткой. Полученные результаты экспериментов позволили выделить следующие закономерности:

2.1. Существенное влияние на формирование капельной структуры за сопловой решеткой оказывает начальное состояние. Основным источником крупных капель является срыв водяной пленки с поверхности лопатки, отражение или выбивание части пленки в результате удара капель о поверхность профиля.

2.2. На небольшом перегреве и насыщении пара перед решеткой концентрация образованных капель на одном режиме течения меняется во времени, причем капельный след имеет волнообразную структуру во всём диапазоне скоростей потока.

2.3. На сверхзвуковых режимах изменение положения и интенсивности скачков уплотнения, взаимодействие между скачками уплотнения и конденсации, приводит к формированию нестационарного капельного следа. При этом волнообразная структура капельного следа исчезает.

2.4. В сопловой решетке с суживающимися каналами на перегретом паре с ростом $M_{1T} > 1$ при достижении требуемого переохлаждения в центрированной волне разрежения возникает скачок конденсации. В результате взаимодействия скачка конденсации с адиабатическими скачками режим течения становится нестационарным. При этом происходит изменение частоты и рост уровня динамических пульсаций. Увеличивается неравномерность потока за решеткой, что может приводить к возникновению дополнительных возмущающих

аэродинамических сил 2-го рода. С уменьшением начального перегрева до состояния насыщения при постоянном M_{1T} нестационарный режим сохраняется. На состоянии насыщения нестационарный режим течения реализуется во всем диапазоне режимов с $M_{1T} > 1$. Дискретизация частот колебаний скачка уплотнения обусловлена взаимодействием соседних каналов решетки и возможным наличием угловой точки - выходной кромки.

2.5. Максимальный динамический уровень пульсаций давления на перегретом, насыщенном и влажном паре достигается на трансзвуковом режиме $M_{1T} \approx 1-1,05$, который соответствует максимуму профильных потерь, когда в косом срезе на спинке профиля возникает локальная сверхзвуковая зона, замыкающаяся прямым скачком уплотнения. В диапазоне $M_{1T} = 1,05 - 1,2$ при наличии скачка конденсации существуют низкочастотные расходные колебания потока.

3. При выборе осевого зазора в ступени необходимо учитывать значительное ускорение крупных капель за решеткой в зависимости от срабатываемого теплоперепада. Наибольшая концентрация крупнодисперсной влаги наблюдается в капельном следе вблизи выходной кромки, где минимум коэффициента скольжения составляет $v = 0,1 - 0,3$.

3.1. На дозвуковом ($M_{1T} < 1$) режиме течения коэффициент скольжения на расстоянии $0,2b$ достигает значений $v = 0,8$.

3.2. При сверхзвуковом режиме течения ускорение капель значительно ниже. На расстоянии $0,2b$ от фронта решетки коэффициент скольжения увеличивается только до $v = 0,4$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филиппов Г.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Тищенко В.А. Разработка методики применения лазерной диагностики для исследования характеристик полидисперсных влажнопаровых потоков// Известие РАН. Энергетика. 2010. № 6. С. 11 – 20.

2. Грибин В.Г., Лисянский А.С., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Тищенко В.А. Особенности образования жидкой фазы и формирования структуры потока пара в сопловой решетке// Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 24 – 29.

3. Филиппов Г.А., Грибин В.Г., Лисянский А.С., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Тищенко В.А. Экспериментальное исследование влияния начальной влажности на распределение параметров эрозионно опасной жидкой фазы за сопловой турбинной решеткой// Вестник МЭИ. 2013. №1. С. 55 – 61.

4. G. Filippov, V. Gribin, A. Tischenko, I. Gavrilov, V. Tischenko. Experimental studies of polydispersed wet steam flows in turbine blade cascade //

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2014. V. 228(2). P. 168-177.

5. **Тищенко А. А., Гаврилов И.Ю.** Оптические методы исследования влажнопаровых потоков// Тез. докл. XV Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2009. Т. 3. С. 228 – 229.

6. **Грибин В.Г., Тищенко В. А., Гаврилов И.Ю., Тищенко А.А.** Исследование структуры влажно-парового потока в элементах проточных частей турбомашин// Тез. докл. XVI Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2010. Т. 3. С. 268 – 269.

7. **G. Filippov, V. Gribin, A. Tischenko, I. Gavrilov, V. Tischenko.** Technique development of application of laser diagnostics to investigate the characteristic of moist-steam polydisperse flows// 9th conference on Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow. Pilsen, 2010. P. 23 – 30.

8. **Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю.** Разработка методики применения лазерной диагностики для исследования изолированных решеток турбомашин// Тез. докл. XVII Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2011. Т. 3. С. 228 – 229.

9. **Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю.** Методика применения метода РТВ для исследования влажного и насыщенного пара // Тез. докл. XVIII Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2012. Т. 4. С. 228 – 229.

10. **G. Filippov, V. Gribin, A. Tischenko, I. Gavrilov, V. Tischenko** Experimental studies of wet-steam polydisperse flows in turbine blade cascades// Baumann Centenary Wet Steam Conference. Cambridge. 2012. Paper BCC-2012-17.

11. **Гаврилов И. Ю., Попов В. В., Тищенко В. А., Хомяков С. В.** Экспериментальное исследование течения полидисперсного влажнопарового потока за сопловой решеткой турбины // Тезисы доклада конференции «III конференция молодых специалистов инженерно-технических служб ОАО «Силловые машины». 2012. С. 28 – 29.

12. **Грибин В.Г., Гаврилов И.Ю., Хомяков С.В., Иванов М.А.** Результаты экспериментального исследования влияния вдува греющего пара на характеристики жидкой фазы за турбинной решеткой// Тез. докл. XIX Межд. науч.-техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва. 2013. Т. 4. С. 179 – 180.