

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ
ПОТОКОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМАШИН: ОСНОВНЫЕ
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПУТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ¹

© 2024 г. В. А. Тищенко^a, А. А. Тищенко^{a, *}, В. Г. Грибин^a, В. В. Попов^{a, **},
И. Ю. Гаврилов^a, К. А. Бердюгин^a, Д. Г. Соколов^a

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: TishchenkoAA@mpei.ru

**e-mail: PopovVitV@mpei.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 27.11.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Представлен обзор результатов применения систем лазерной диагностики для исследования течения влажного пара в элементах проточных частей паровых турбин, в частности в каналах различной конструкции. Накопленные за более чем десятилетний период результаты экспериментов позволили обобщить и сформулировать основные особенности движения крупной эрозионно-опасной влаги за турбинными решетками и в межлопаточных каналах. С помощью данных визуального анализа выделены области, в которых присутствуют частицы жидкой фазы. Приведены результаты применения методов PIV/PTV (particle image velocimetry/particle tracking velocity), реализующих алгоритмы определения векторных полей скоростей частиц. Рассмотрены особенности распределения кинематических характеристик жидкой фазы в различных областях турбинных решеток, от которых зависит интенсивность эрозионного износа. Представлены данные о влиянии профиля лопатки на формирование траекторий потоков капель, предложены пути повышения сепарационной способности лопатки, работающей в условиях влажно-паровых потоков. С помощью экспериментальной базы о полях скоростей жидкой фазы в турбинных каналах различной конфигурации сформулирована полуэмпирическая модель поведения крупных эрозионно-опасных капель, описывающая их движение в спутном паровом потоке и процессы взаимодействия со стенками межлопаточных каналов. Представлен обзор технических решений, которые были получены на основе теоретических и экспериментальных исследований влажно-паровых потоков с использованием систем лазерной диагностики. Рассмотрена концепция обогрева поверхностей лопаток и выдува струи греющего пара и оптимизации системы внутриканальной сепарации. Сформулированы принципы развития подходов, основанных на системах лазерной диагностики потоков, в области применения нейронных сетей, которые должны существенно расширить возможности экспериментальных исследований, поскольку потенциально могут увеличить объем данных, получаемых при реализации подобных экспериментальных методов.

Ключевые слова: паровые турбины, турбинная решетка, влажный пар, эрозионно-опасная влага, газодинамика двухфазных сред, ступень турбины, нейронные сети, траектории капель, спутный паровой поток

DOI: 10.56304/S0040363624050096

В последних ступенях паровой турбины практически во всех режимах движется влажно-паровой поток, который имеет довольно сложное распределение параметров двухфазной среды. При этом механизм образования жидкой фазы в различной ее форме крайне сложен, что связано со

множеством процессов, вовлеченных в генерацию дискретных частиц. Как результат, перед последней ступенью турбины и в самой ступени происходит движение полидисперсного потока капель, направление и скорость которых варьируются в зависимости от различных зон и условий их образования. Термодинамическое межфазовое взаимодействие существенно влияет на эффек-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00445).

тивность последних ступеней турбины, а крупные эрозионно-опасные капли, движущиеся с существенным скольжением в основном потоке, являются главным источником эрозионного износа поверхностей рабочих лопаток.

Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные ранее в различных организациях разных стран как на турбинных решетках в статических условиях, модельных ступенях при искусственном создании влажности, так и в натуральных цилиндрах турбин и двухвальных экспериментальных турбинах с естественным образованием влаги, позволили существенно уточнить методы расчета влажно-парового потока и наметить конкретные меры по снижению отрицательного влияния влаги на эффективность и надежность турбоагрегата [1–5]. Однако в литературе практически отсутствуют обобщения результатов, полученных различными исследователями. При расчетах турбин используются методы учета влияния влажности пара, которые базируются, как правило, на результатах собственных исследований, проведенных специалистами на различных предприятиях. Эти результаты могут весьма существенно различаться, что объясняется, прежде всего, сильным влиянием геометрических и режимных характеристик ступеней турбин. Исключением может являться работа [6], в которой обобщены данные, полученные в разных организациях. Авторы [6] рассмотрели влияние влажности пара на экономичность одиночных ступеней, многоступенчатых модельных и натуральных отсеков турбин при естественном образовании влаги в турбине и искусственном увлажнении пара с помощью форсунок.

Тем не менее, картина формирования и движения частиц жидкой фазы в ступенях паровых турбин до конца пока не ясна. Это связано со сложностью проведения как экспериментальных, так и численных исследований. Однако современные методы с применением лазерной диагностики влажно-паровых потоков позволяют более детально изучить кинематику процессов в элементах проточных частей турбомашин.

В настоящей работе рассматриваются результаты многолетних экспериментальных исследований, выполненных на кафедре паровых и газовых турбин НИУ МЭИ на пародинамическом стенде контура влажного пара (КВП). Благодаря применению системы лазерной диагностики потоков “Полис” были созданы визуальная картина и база данных по формированию и движению частиц жидкой фазы в сопловых решетках различной конструкции. Визуализацию потоков жидкой фазы осуществляли на входе в сопловую решетку и за ее пределами, а также в межлопаточном канале. Опыты проводили на перегретом, насыщенном и влажном паре при до-, около- и сверхзвуковых скоростях потока.

Выполненные исследования позволили сформировать базу данных, на основе которой можно в дальнейшем прогнозировать характер и интенсивность оседания частиц жидкой фазы на поверхности межлопаточных каналов и распределение параметров эрозионно-опасных капель перед рабочей решеткой влажно-паровой ступени с использованием методов машинного обучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И СХЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ

Принципиальная схема стенда КВП представлена на рис. 1, диапазон возможных параметров экспериментальной установки приведен далее:

Давление полного торможения перед исследуемым объектом (абс.), кПа.....	20–90
Состояние пара перед исследуемым объектом:	
перегрев относительно температуры насыщения, °С.....	70
начальная влажность, %.....	10
Теоретическое число Маха за исследуемым объектом.....	0.4–1.5

Стенд представляет собой замкнутый контур, в который поступает перегретый пар (рабочее тело) из отбора паровой турбины ТЭЦ МЭИ. Управление начальным состоянием пара осуществляется с помощью ступеней увлажнения 1, 3, в которых в пар впрыскивается питательная вода, поступающая из отдельного коллектора 4. При этом обеспечивается возможность регулировать состояние пара от перегрева (70°C) до насыщения перед исследуемым объектом 7. Ступени увлажнения находятся на значительном расстоянии от ресивера, благодаря чему рабочее тело подходит к нему в состоянии термодинамического равновесия. Для создания влажно-паровой среды применяется блок форсунок 5, расположенных в ресивере, с помощью которых осуществляется впрыск питательной воды в предварительно доведенный до насыщенного состояния пар. Регулируя расход впрыскиваемой воды, можно изменять влажность пара вплоть до 10%. Распределения размеров инжектируемых в поток капель воды при этом известны. В каждом режиме работы форсунок дисперсный состав рабочего тела был предварительно измерен с помощью зонда отпечатков. Подготовленное рабочее тело направляется из ресивера в исследуемый объект, затем сбрасывается в конденсатор 8, после которого возвращается в цикл ТЭЦ.

Особенность установки — возможность изменять съемные рабочие части, устанавливаемые между ресивером и выхлопом в конденсатор. Это позволяет исследовать движение двухфазной сре-

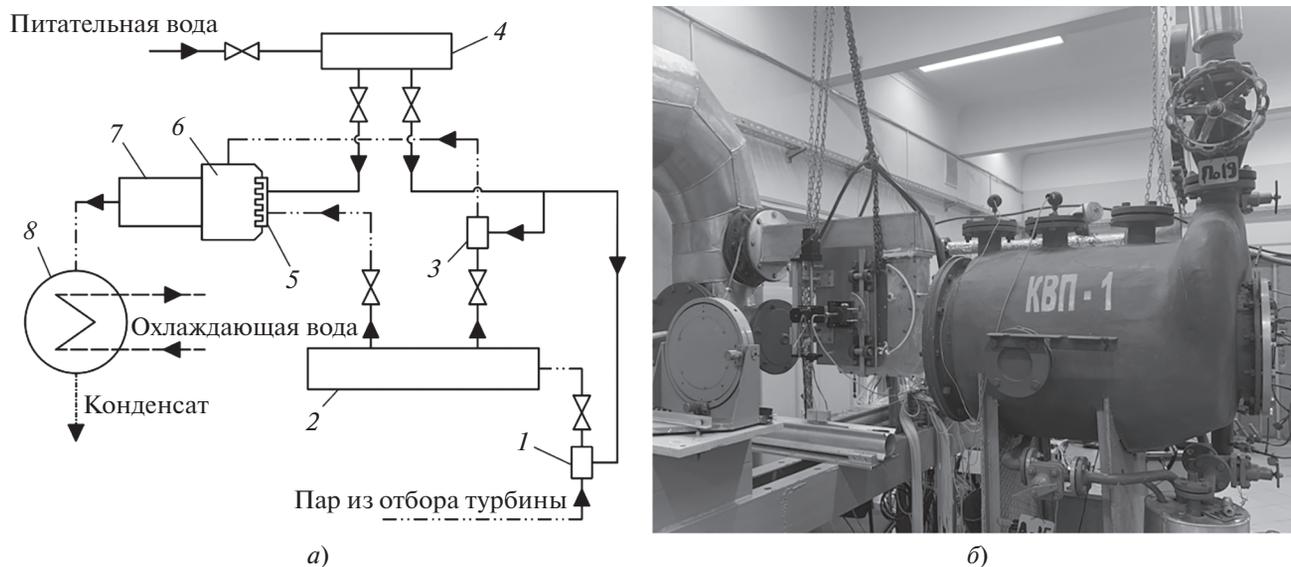


Рис. 1. Схема экспериментального пародинамического стенда КВП (а) и его внешний вид (б). 1, 3 – первая и вторая ступень увлажнения; 2, 4 – коллектор паровой и питательной воды; 5 – блок форсунок; 6 – ресивер; 7 – рабочая часть с исследуемым объектом; 8 – конденсатор

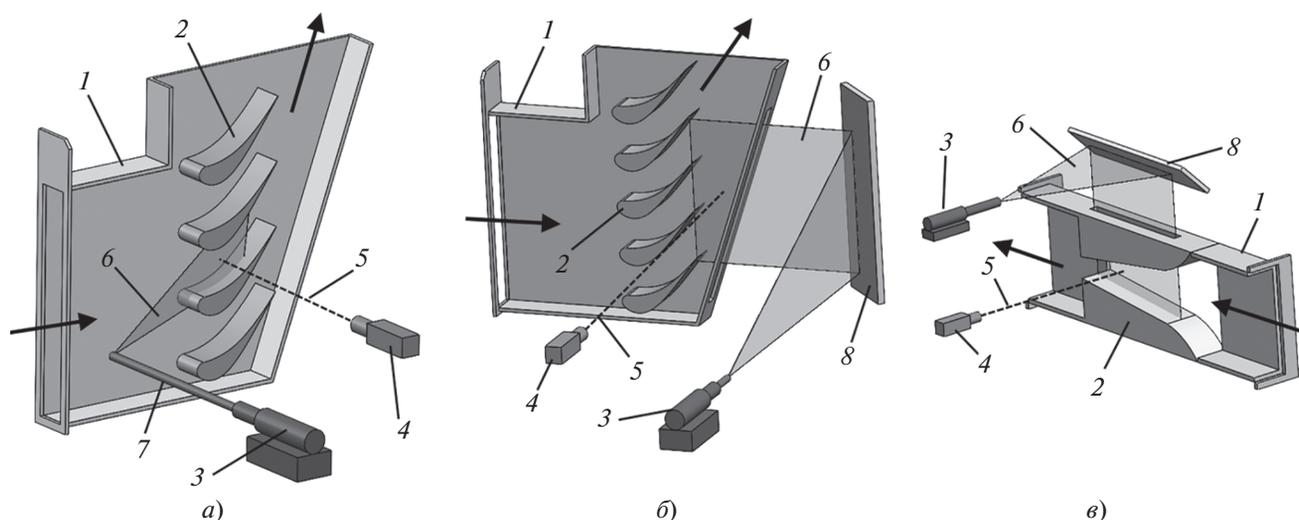


Рис. 2. Схемы исследования влажно-парового потока в элементах проточных частей турбомашин в зоне межлопаточного канала (а), за выходной кромкой решетки (б), в одиночном канале (в). 1 – рабочая часть; 2 – исследуемый объект; 3 – импульсный лазер; 4 – скоростная камера; 5 – оптическая ось камеры; 6 – лазерный нож; 7 – эндоскоп; 8 – зеркало

ды как в каналах разной геометрической формы (одиночные каналы или решетки турбомашин), так и в различных характерных зонах течения (за межлопаточным каналом или внутри него). На рис. 2 показаны конфигурации рабочих частей и оптические схемы исследования. При эксплуатации стенда было установлено, что, наряду с решением задач, связанных с особенностями движения рабочего тела в проточных частях паровых

турбин, он может быть использован для исследования процессов в газотурбинной установке. В частности, было отмечено, что при охлаждении лопаточных аппаратов термодинамические свойства перегретого пара близки к свойствам продуктов сгорания в трактах газовых турбин.

Помимо штатной системы пневмометрических измерений, позволяющей контролировать режим работы стенда и распределение газодина-



Рис. 3. Фотография засвеченных капель за выходной кромкой сопловой решетки

мических параметров основного потока, стенд КВП оснащен системой лазерной диагностики потоков (см. рис. 2). Эта методика измерения существенно расширяет возможности экспериментального исследования движения частиц жидкой фазы в элементах проточных частей турбомашин. Сдвоенный импульсный лазер 3 генерирует два лазерных импульса, время между которыми задается в процессе эксперимента (от 100 нс до нескольких секунд в зависимости от скорости потока). Проходя через специальную оптическую систему, лазерный луч раскрывается в плоский нож 6 и направляется в исследуемую область с помощью зеркала 8 либо оптического эндоскопа 7. При попадании света в зону потока происходит засветка движущихся в нем частиц жидкой фазы, что позволяет зафиксировать их образы скоростной фотокамерой 4, ось 5 которой расположена перпендикулярно плоскости лазерного ножа. Таким образом, с помощью системы получают две фотографии мгновенной картины движения трассеров (в данном случае капель жидкой фазы) через известный промежуток времени, задаваемый периодичностью импульсов лазера. На рис. 3 представлена фотография засвеченных капель в области за сопловой решеткой.

При работе оборудования системы лазерной диагностики формируются фотографии структуры частиц жидкой фазы, движущихся в потоке. Для набора статистических данных при проведении экспериментальных исследований выполняется генерация от 1000 до 5000 пар подобных фотографий. Важные особенности этой оптической методики – обеспечение бесконтактного подхода к измерениям и отсутствие существенных искажений в потоке.

ВИЗУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАПЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ЗА РЕШЕТКАМИ И ВНУТРИ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ

Благодаря визуализации структуры течения частиц жидкой фазы появляются дополнительные возможности для анализа и физической интерпретации особенностей движения полидисперсных потоков дискретных частиц в элементах проточных частей турбомашин. Визуальный анализ позволяет выявлять капельные структуры, которые создают основную опасность при эрозионном износе или оказывают негативное влияние на эффективность работы влажно-паровых ступеней. Как показано в [7–9], эволюция параметров жидкой фазы в цилиндре низкого давления (ЦНД) от ступени к ступени представляет собой комплекс сложных процессов ее взаимодействия с подвижными и неподвижными лопаточными аппаратами. При этом, если не рассматривать термодинамические параметры межфазового взаимодействия, то кинематические и физические характеристики капельных потоков эрозионно-опасных частиц жидкой фазы перед рабочими лопатками последних ступеней турбины будут определяться условиями их движения в сопловых решетках [10]. Визуальные исследования капельных структур дают возможность выявить зоны проявления этих потоков, качественно оценить влияние различных параметров на интенсивность их развития.

За сопловой решеткой картина капельной структуры подробно рассматривалась в работах [11–13]. На рис. 4, а представлена фотография засвеченных капель жидкой фазы, типичная для закромочной области при влажном состоянии пара перед решеткой. Выделяются специфические группы частиц жидкой фазы, характер движения и процессы образования которых существенно различаются. Они рассмотрены далее.

Капли малых размеров перемешаются в ядре основного потока с минимальной скоростью, а траектории их движения близки к линиям тока рабочего тела. На фотографиях они выглядят как засвеченный “туман”. Исследования [12, 14, 15] показали, что при условиях течения в ЦНД паровых турбин размеры этих капель составляют менее 10 мкм, а их доля – не менее 90% всей массы влаги в турбине [16]. При подобных диаметрах сила аэродинамического сопротивления, действующая со стороны основного потока и вносящая значительный вклад в изменение импульса дискретного трассера, способна обеспечивать движение капель вдоль линий тока паровой фазы. Эта влага, как правило, преодолевает стационарный межлопаточный канал без контакта с ним и практически не участвует в формировании пленки воды на поверхностях сопловых лопаток. Как показали результаты численного моделирования,

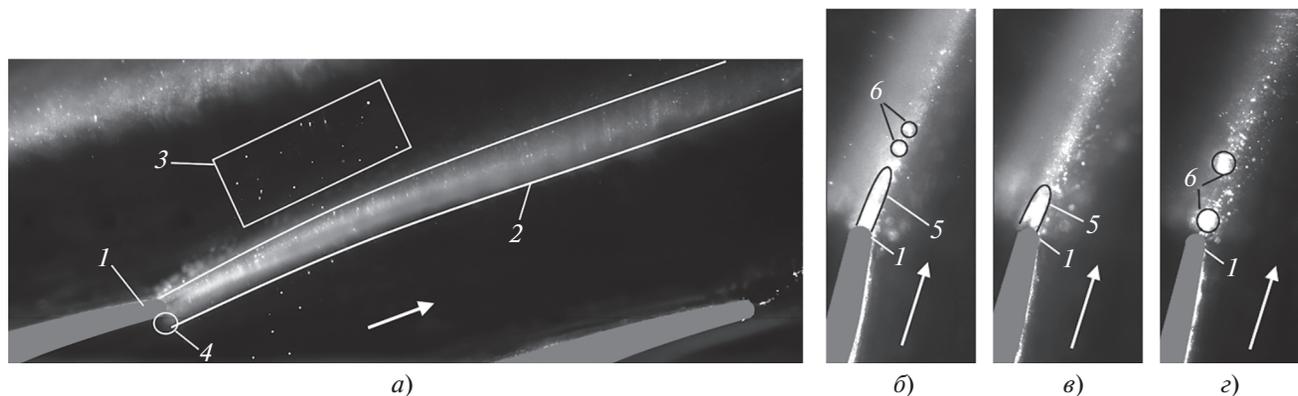


Рис. 4. Капельная структура за сопловой решеткой (*а*) и образование частиц жидкой фазы при сходе пленки воды с выходной кромки при различной начальной влажности y_0 (*б–г*).

1 – выходная кромка сопловой лопатки; 2 – зона кромочного капельного следа; 3 – капли со стороны спинки лопатки; 4 – выход частиц жидкой фазы из “капельного” слоя; 5 – “язычок” сходящей пленки; 6 – крупные фрагменты сорванной пленки воды.

y_0 , %: *б* – 8.4; *в* – 5.4; *г* – 3.4

подобные капли в первую очередь участвуют в термодинамическом межфазовом взаимодействии [17] и являются главным источником потерь, связанных с наличием жидкой фазы в потоке.

Капли крупных размеров имеют наибольшие диаметры в потоке, образуются при срыве пленки воды с поверхности лопатки в кромочном следе и формируют его. Область их локализации ограничена закромочной зоной (область 2 на рис. 4, *а*). При этом механизм их образования также отчетливо наблюдается при визуальной фиксации с помощью системы лазерной диагностики потоков. На рис. 4, *б* представлены фотоснимки процесса их формирования при различной начальной влажности y_0 . В зависимости от условий, которые влияют на формирование и развитие пленки, особенности ее схода с поверхности лопатки и последующего разрушения могут меняться. Как следует из представленных данных, с увеличением начальной влажности разрушение пленки происходит дальше от выходной кромки, а формирующийся при ее сходе “язычок” удлиняется. Наблюдаемая картина хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями [18]. Процесс генерации капель в этой зоне имеет критически важное значение для надежного функционирования рабочих лопаток при эрозионном износе. Появление крупных капель влаги напрямую связано с механизмами оседания и взаимодействия частиц жидкой фазы на поверхностях межлопаточного канала с последующим образованием пленки воды. Кроме того, на рис. 4, *а* наблюдается поток капель со стороны вогнутой поверхности (область 4), который не является результатом срыва пленки воды и относится к так называемому “капельному слою” [10, 14], формирующемуся в межлопаточном канале в результате сложных процессов взаи-

модействия частиц жидкой фазы со стенками профилей.

Крупные частицы влаги движутся с большими углами выхода (область 3 на рис. 4, *а*) в зоне со стороны спинки лопатки. Они вылетают из межлопаточного канала и пересекают кромочный капельный след [12]. Их появление связано со строением сопловой решетки и определяется шириной “аэродинамической” тени межлопаточного канала. Как будет показано далее, эти капли могут не взаимодействовать с поверхностями межлопаточного канала, но они могут образовываться в результате срыва пленки воды с поверхности спинки в области входной кромки.

Представленные описания капельных структур за решеткой являются обобщением большого количества данных об исследованных сопловых решетках. Тем не менее, для большинства из них картина качественно остается неизменной, хотя, безусловно, она изменяется при варьировании режимных параметров течения и строения самих лопаток. Необходимо отметить, что процессы в межлопаточных каналах весьма существенно влияют на формирование капельных потоков за решеткой.

Помимо распределения влаги за решеткой во влажно-паровых потоках важным является вопрос первичного возникновения жидкой фазы в проточной части турбины в переохлажденной паровой среде. Как показано в [8], в зависимости от зоны, в которой начинается первичная нуклеация, будет формироваться зародыши капель с различными начальными размерами, влияющими на их концентрацию, суммарную площадь контакта с основной фазой, и, как следствие, на интенсивность роста размеров частиц жидкой фазы. В работе [13] были рассмотрены процессы

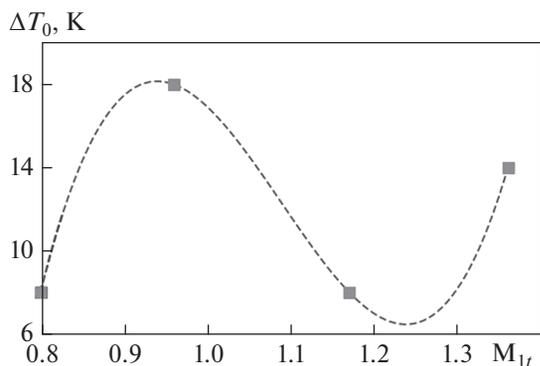


Рис. 5. Начальный перегрев пара перед решеткой, при котором в закрюточной области начинается первичная нуклеация

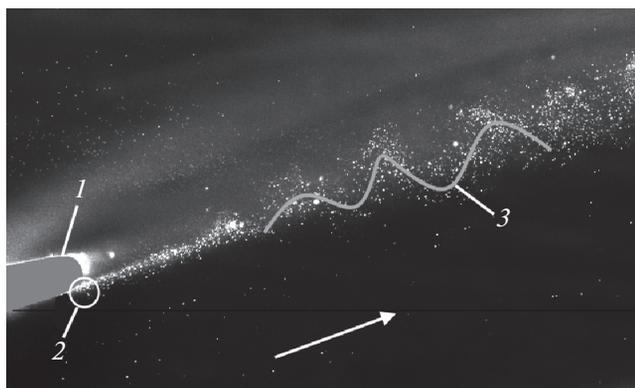


Рис. 6. Капельная структура первичной влаги в закрюточной области.

1 – выходная кромка; 2 – область образования ядра переохлажденного пара; 3 – волнообразная форма закрюточного капельного следа

формирования кромочного капельного следа за сопловой лопаткой при сухом насыщенном паре перед решеткой в диапазонах режимов от дозвукового до сверхзвукового (число Маха за решеткой M_{1r} составляет 0.80–1.32). Исследование заключалось в непрерывном анализе визуальной структуры капельных потоков за решеткой по мере уменьшения начальной температуры перегретого пара перед ней и фиксации режимов появления частиц жидкой фазы, что соответствует переходу через зону Вильсона. Начальный перегрев ΔT_0 рассчитывали по формуле

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

где T_0 – температура полного торможения пара в ресивере стенда; $T_s(p_0)$ – температура насыщения пара при давлении полного торможения p_0 в ресивере.

В результате были получены значения начального перегрева, при которых в заданном режиме

течения происходит фазовый переход в канале (рис. 5). Столь сложная зависимость начального переохлаждения от числа Маха определяется развитием волновой структуры потока при переходе от дозвуковых режимов к режимам с появлением сначала локальной сверхзвуковой зоны, а затем и развитой системы внутреннего и внешнего кромочных скачков уплотнения, которые, взаимодействуя с областью пограничного слоя, изменяют условия течения пара в этих зонах [3].

Визуализация наблюдаемой картины представлена на рис. 6. Это типичное явление – первичное образование влаги, которое происходит во всех рассмотренных режимах не в донной области выходной кромки, на спинке лопатки или в закрюточном следе, а на вогнутой поверхности профиля вблизи выходной кромки (область 2). Такое явление обусловлено повышенной степенью турбулентности, вызванной развитием механизма Гетлера – Тейлора на вогнутой поверхности, который превалирует при обеспечении необходимого переохлаждения для интенсификации релаксационных процессов. Таким образом, визуальный анализ позволил выявить основной механизм и область первичной нуклеации в решетках турбин.

Исследование показало (см. рис. 6), что образующиеся в результате конденсации переохлажденного пара капли продолжают свое движение в области за решеткой и формируют поток, структура которого определяется закрюточной вихревой дорожкой паровой фазы, при этом сам процесс является нестационарным. Переход на сверхзвуковые режимы и формирование скачков уплотнения (особенно внешнего кромочного) существенно влияют на форму и структуру потоков подобных капель и отклоняют траектории их движения аналогично паровому потоку [11].

Как отмечалось ранее, картина движения капель за решеткой зависит от процессов, протекающих в межлопаточных каналах. Применение эндоскопов, с помощью которых можно исследовать капельные потоки внутри решеток, позволяет существенно расширить понимание особенностей движения частиц жидкой фазы в пределах межлопаточного канала (этой тематике посвящены работы [14, 19, 20]). Визуальный анализ показал, что внутри межлопаточных каналов можно выделить характерные области, протекание процессов в которых определяет особенности распределения капель в соответствии с их параметрами за решеткой (рис. 7).

Области “фонтана” вторичных капель 1, 2 образовались при соударении первичной влаги с входными кромками лопаток, которое сопровождается высокой энергией вследствие малого угла набегания капли на поверхность относительно нормали. Как результат, практически вся первич-

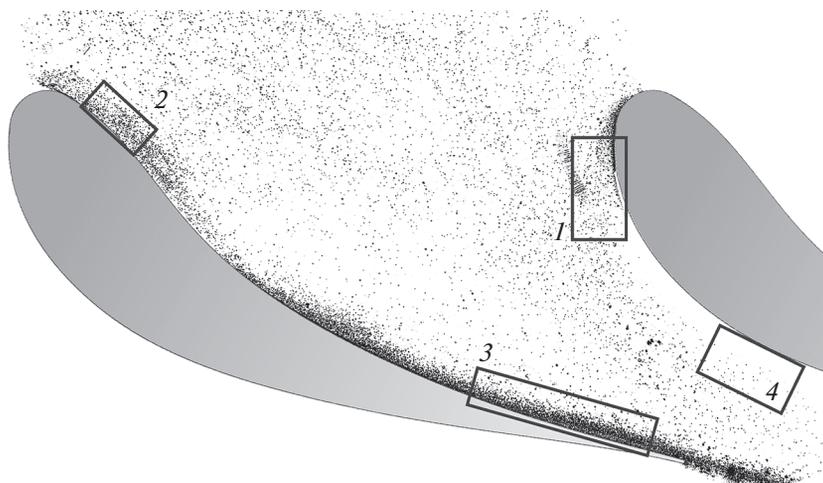


Рис. 7. Капельная структура в межлопаточном канале.

1, 2 – область “фонтана” капель со стороны спинки и вогнутой поверхности; 3 – область “капельного” слоя; 4 – зона “аэродинамической тени” для капель в межлопаточном канале

ная влага выбрасывается в поток в виде вторичных капель с широкими диапазонами начальных углов и скоростей и минимальной интенсивностью оседания на поверхности в виде пленки. Как показали исследования, именно частицы жидкой фазы из “фонтана” зоны 1 являются основными каплями потока за решеткой со стороны спинки лопатки (см. область 3 на рис. 4, а);

“Капельный слой” 3, содержащий первичные и вторичные капли, образовавшиеся в результате соударения первичной влаги с поверхностью, распространяется вдоль всей вогнутой поверхности лопатки.

Зона “аэродинамической тени” 4 для инертных частиц жидкой фазы, не способных перемещаться вдоль линий основного потока, образуется вследствие криволинейной формы межлопаточного канала. Она располагается вдоль спинки лопатки за точкой максимальной кривизны поверхности. Ее протяженность и конфигурация определяются, в первую очередь, строением лопаток и параметрами решетки.

Полученные визуальные данные подтверждают ранее сформулированные теоретические представления о характере движения частиц жидкой фазы в межлопаточных каналах [3].

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ ЗА РЕШЕТКОЙ И ВНУТРИ МЕЖЛОПАТОЧНЫХ КАНАЛОВ

Визуализация засвеченных капель позволяет рассмотреть особенности формирования потоков частиц жидкой фазы. При этом в системе лазерной диагностики для оценки параметров засвеченных трассеров используют в качестве инструментов PIV- и PTV-методы [21]. Основная задача

каждого из них – установить векторы скоростей капель с помощью фотографий, сделанных при проведении эксперимента. Результат работы этих методов – определение мгновенных полей скоростей по смещению частиц жидкой фазы на следующих один за другим фотоснимках. Важнейшим различием двух методов является подход к оценке векторов скоростей: с помощью PIV-метода рассчитывают среднее значение в фиксированной элементарной области, с помощью PTV-метода – вектор скорости каждой отдельно детектированной частицы (рис. 8).

Анализ полей скоростей частиц жидкой фазы производится не по мгновенным данным о распределении параметров, представленным в одной серии фотоснимков, а путем статистической обработки целого набора таких фотоснимков. Для каждого режима в процессе эксперимента проводили от 1000 до 2000 фотофиксаций засвеченных лазерным “ножом” капель, после чего рассчитывали осредненные по режиму поля скоростей. Таким образом, на один режим, в зависимости от исследуемой зоны и характера течения, приходится от сотен тысяч до сотен миллионов засвеченных трассеров. Помимо значений скоростей, дополнительная обработка экспериментальных данных и сопоставление их с результатами измерения другими методами, а также с данными численного моделирования позволяют получить информацию о траекториях капельных потоков, их средних диаметрах, концентрации и других параметрах [12, 14, 22, 23].

В работе [24] получено распределение количества капель в межлопаточном канале (рис. 9). Представленная на рисунке картина хорошо коррелирует с данными визуализации потоков капель (см. рис. 7), однако в этом случае при исследова-

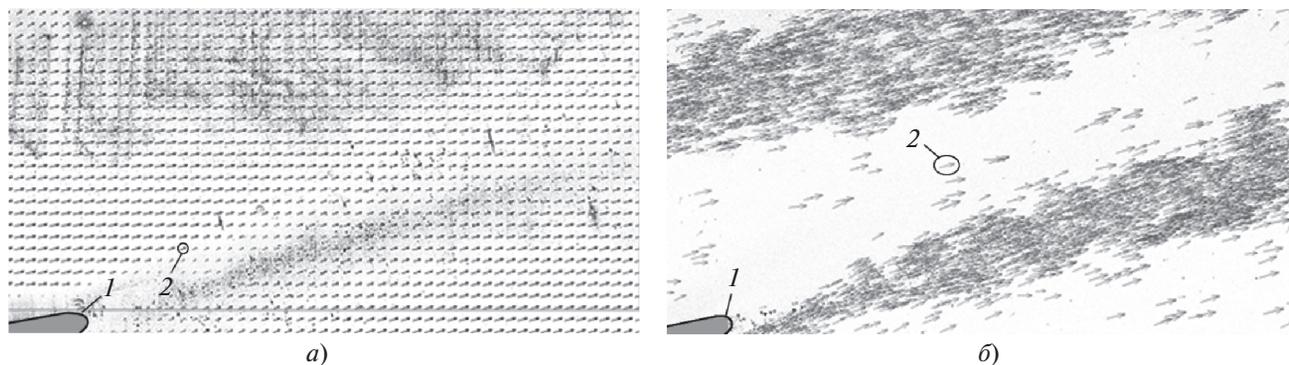


Рис. 8. Векторные поля капель за решеткой, определяемые методами PIV (а) и PTV (б). 1 – выходная кромка сопловой лопатки; 2 – отдельный вектор скорости

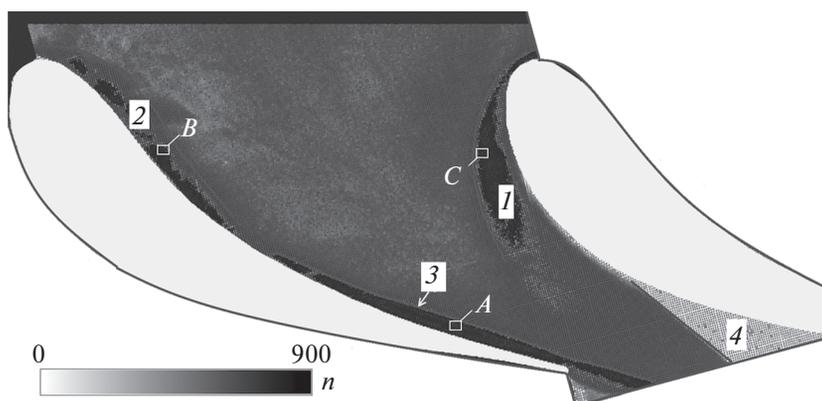


Рис. 9. Распределение количества обнаруженных образов капель n в зонах A , B , C межлопаточного канала сопловой решетки.

1, 2 – область “фонтана” капель со стороны спинки и вогнутой поверхности; 3 – область “капельного” подслоя; 4 – зона “аэродинамической тени” для капель в межлопаточном канале

нии имеется количественная характеристика, определяющая особенности распределения влаги в элементах проточных частей турбомашин. Каждая из выделенных на рис. 9 зон движения капель характеризуется особым распределением параметров частиц жидкой фазы.

На рис. 10 представлены значения вертикальной c_y и горизонтальной c_x составляющих скоростей каждой капли, полученных с помощью PTV-метода в зонах A , B и C , расположение которых указано на рис. 9 [19]. Зона A – это область “капельного” подслоя вдоль вогнутой поверхности лопатки 3, зона B – область “фонтана” со стороны вогнутой поверхности 2, зона C – область “фонтана” со стороны спинки 1. Приведенные данные соответствуют режиму при теоретическом числе Маха за решеткой 0.8 и начальной влажности 3%. В каждой из областей удалось составить статистику по более чем 10000 капель благодаря большому числу серий фотоснимков, полученных в результате применения системы

лазерной диагностики потоков. По этим распределениям хорошо прослеживается разброс по скоростям в характерных областях. При этом четко видны границы перехода из одной зоны в другую, показанные на рис. 9 как перестроения скоростных характеристик капельных потоков. Так, в области “капельного” слоя (зона A , см. рис. 10, а) наблюдается значительный разброс вертикальной составляющей скорости капель. Анализ показал, что в этой области движутся первичные частицы жидкости, взаимодействующие с поверхностью лопатки, в результате чего образуется пленка воды, а также вторичные капли, движущиеся вблизи вогнутой образующей профиля и формирующие “капельный” слой вдоль нее. Знание характеристик частиц жидкости в этой области крайне важно для борьбы с эрозионно-опасной влагой. Область 4 (см. рис. 4), в которой происходит срыв пленки воды с выходной кромки, является источником опасных для рабочих лопаток вторичных частиц жидкой фазы, движу-

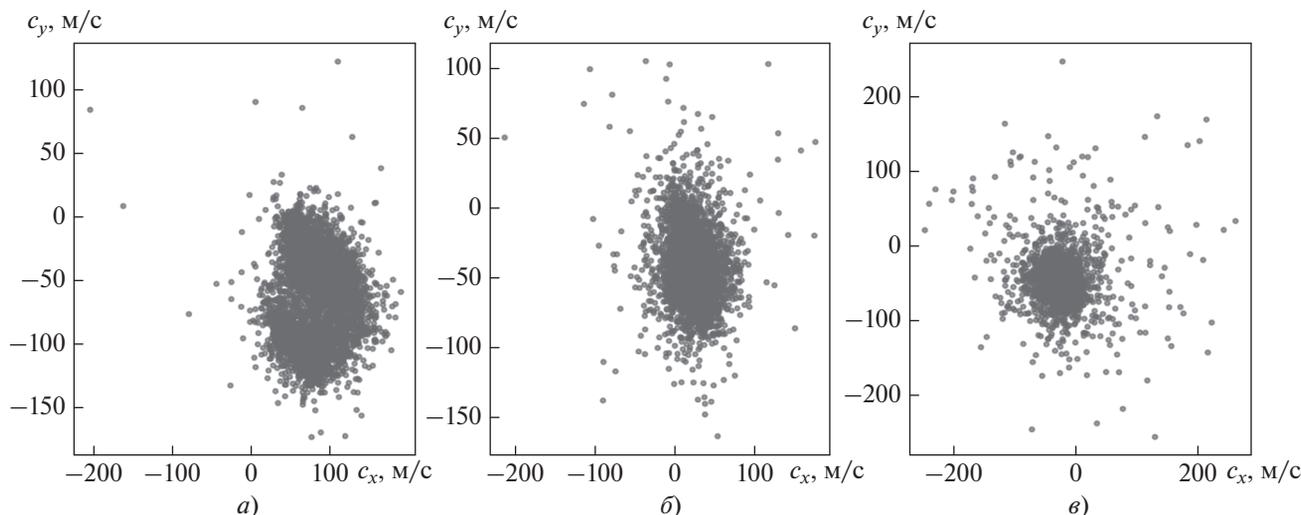


Рис. 10. Распределение скоростей капель в характерных областях движения капельных потоков. *а* – зона “капельного подслоя” (зона *A*); *б* – зона “фонтана” со стороны вогнутой поверхности (зона *B*); *в* – зона “фонтана” со стороны спинки (зона *C*)

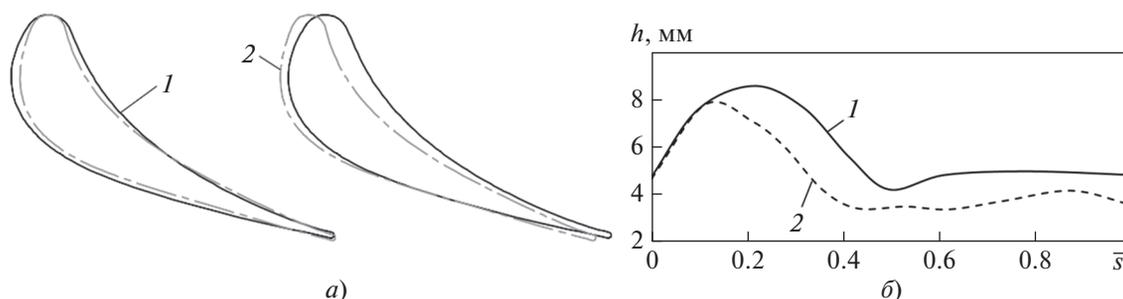


Рис. 11. Строение исходной и влажно-паровой решеток (*а*) и толщина “капельного” подслоя h вдоль вогнутой поверхности лопатки \bar{s} (*б*).

1 – исходный профиль; *2* – влажно-паровой профиль

щихся за решеткой в зоне закрюченного капельного следа. Необходимо “прижать” “капельный слой” как можно ближе к вогнутой поверхности, чтобы обеспечить возможность его удаления через сепарационные щели в сопловых лопатках.

Исследования показали, что существенное влияние на ширину зоны движения капель в этой области межлопаточного канала помимо плотности основной фазы [14] оказывает строение профиля [25]. На рис. 11, *а* представлены исходный и модифицированный варианты строения лопаток. Модифицированный вариант – попытка обеспечить максимальную сепарационную способность решетки благодаря воздействию строения профиля на потоки капель в межлопаточных каналах. Основная идея перепрофилирования заключалась в организации вогнутой поверхности таким образом, чтобы в большинстве точек взаимодействия первичных капель с ней угол соударения был минимальным. Это снижает энергию удара и

уменьшает интенсивность генерации вторичных капель [22, 26, 27]. Как результат, большая часть первичных капель оседает на поверхности и вторичные частицы жидкой фазы не формируются. Экспериментальные данные подтвердили идею, заложенную в процесс перепрофилирования. На рис. 11, *б* представлена зависимость толщины “капельного” слоя h от относительной длины вогнутой поверхности лопатки \bar{s} (здесь \bar{s} – отношение координаты вдоль вогнутой поверхности профиля к ее длине).

Другим важным процессом, протекающим в межлопаточном канале, является образование “фонтана” вторичных капель со стороны спинки лопатки (область *I* на рис. 9 и зона *C* на рис. 10). В этой области движутся вторичные частицы жидкой фазы, образовавшиеся в результате их соударения с входной кромкой лопатки. Как показано на рис. 10, капли в этой зоне движутся под довольно существенными углами, пересека-

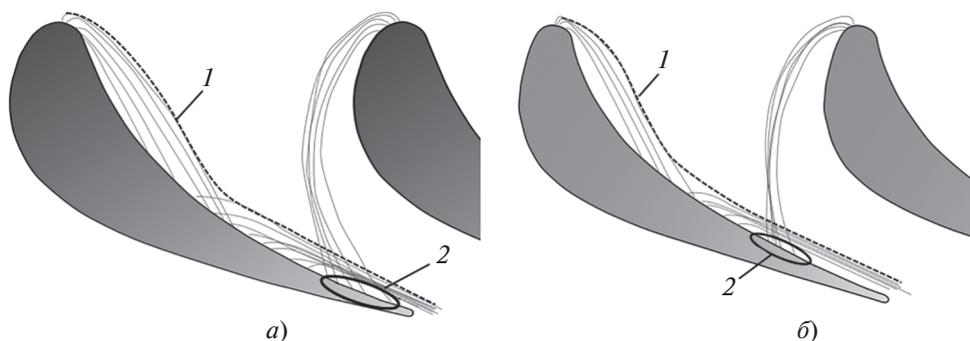


Рис. 12. Траектории капельных потоков в межлопаточных каналах сопловых решеток для исходного (а) и модифицированного (б) профилей. 1 – граница “капельного” подслоя вдоль вогнутой поверхности; 2 – область оседания капель от “фонтана” на входной кромке на вогнутой поверхности профиля

ют межлопаточный канал без контакта с поверхностями и способны вылететь из межлопаточного канала, пересекая кромочный след (см. область 3 на рис. 4, а). Влияние формы входной кромки на этот процесс весьма существенное, поэтому важно обеспечить возможность оседания капель на вогнутой поверхности лопатки в зонах, близких к области расположения сепарационных щелей, а также увеличить длину дуги входной кромки, на которой угол направления скорости первичных капель отклонен от нормали к ней.

Результаты приведенного в [22] исследования подтвердили возможность контроля этого процесса. По данным, представленным на рис. 12, можно сравнить экспериментально определенные траектории капель, которые строили с помощью разработанного алгоритма расчета траекторий потоков капель [14]. Видно, что при модифицированном профиле лопатки вторичные капли “фонтана” оседают значительно раньше по потоку на вогнутой поверхности, что позволяет отсепарировать их.

От процессов, протекающих в межлопаточных каналах, зависят распределение параметров частиц жидкой фазы за сопловой решеткой перед рабочими лопатками и структура капельных потоков в этой области. Как показали экспериментальные данные, основные перестроения капельной структуры за решеткой с изменением начальной влажности пара происходят в капельном следе и вблизи выходной кромки со стороны спинки лопатки. В кромочном капельном следе развиваются такие сложные для исследования процессы, как срыв пленки воды с выходной кромки, дробление влаги основным потоком, коагуляция капель, взаимодействие кромочного капельного следа с ядром потока, конденсация влаги в донной области непосредственно за лопаткой и др. В результате экспериментов [11–13, 24, 28–31] были выделены следующие парамет-

ры, влияющие на распределение характеристик влаги за решеткой: начальная влажность, скорость пара за решеткой, относительная толщина выходной кромки, число Рейнольдса Re , отношение плотностей фаз, средний модальный диаметр капель перед решеткой. На рис. 13 показано влияние начальной влажности y_0 на распределение коэффициентов скольжения капель за решеткой v вдоль ее шага на различных расстояниях от фронта решетки. Значение коэффициента скольжения вычисляется по формуле

$$v = \frac{c_k}{c_n},$$

где c_k – скорость капель за решеткой, определенная с помощью PIV-метода; c_n – скорость паровой фазы, полученная посредством численного моделирования с использованием верифицированного CFD-кода.

Необходимо отметить, что модель математического описания влажно-паровых потоков, применяемая для определения параметров паровой фазы, была адаптирована и верифицирована с помощью результатов экспериментальных исследований [32, 33]. По оси абсцисс на рис. 13 располагается безразмерная координата \bar{x} – отношение координаты вдоль шага решетки к значению ее шага.

Наблюдаемые распределения полностью коррелируют с данными визуального анализа (см. рис. 4, а). На удалении $0.1b$ (где b – хорда профиля) от решетки проявляются два минимума коэффициентов скольжения, относящиеся к кромочному капельному следу, а также частицам жидкой фазы, движущимся со стороны спинки лопатки под большими углами выхода. Исследования показали, что значения коэффициентов скольжения менее 0.95 характерны для влаги с частицами диаметром более 10 мкм и чем ниже значение v , тем больше диаметр частиц. Таким обра-

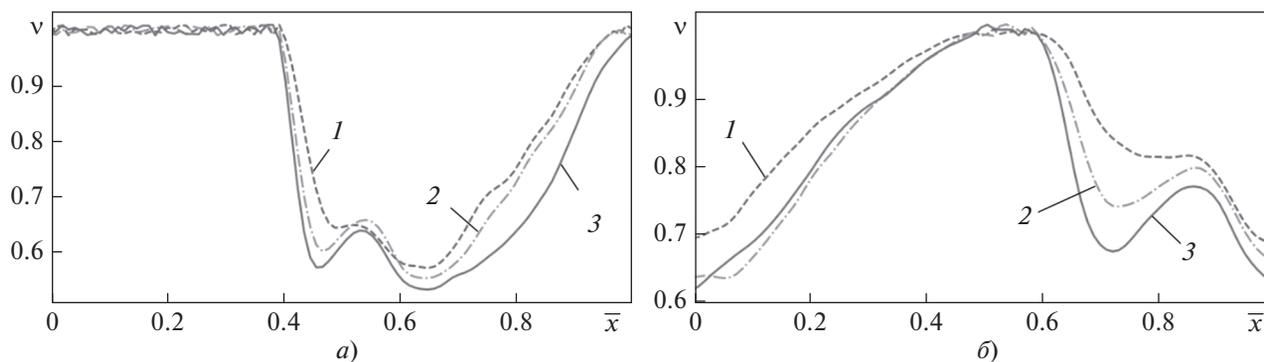


Рис. 13. Распределение коэффициентов скольжения капель v за решеткой вдоль шага на расстоянии 10 (а) и 20% (б) хорды от фронта решетки.

y_0 , %: 1 – 3.4; 2 – 5.4; 3 – 8.4

зом, за решеткой на этом расстоянии от фронта область, в которой движутся крупные эрозионно-опасные капли, занимает примерно 50% всего шага. По мере удаления от решетки зона проявления подобных частиц жидкой фазы распространяется практически вдоль всего шага (см. рис. 13, б). Рост начальной влажности приводит к снижению коэффициентов скольжения, что связано с интенсификацией процессов образования пленки воды на поверхностях межлопаточного канала и увеличением средних размеров капель вследствие ее срыва в закрочной области. Поля скоростей капель, полученные с помощью методов PIV/PTV, дают общую картину распределения кинематических характеристик капель за решеткой.

На рис. 14 представлено распределение коэффициентов скольжения при различном соотношении плотностей фаз среды на входе в решетку $\bar{\rho}$, которое вычисляется по формуле [34]

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_k}{\rho_n},$$

где ρ_k , ρ_n – плотность воды, формирующей каплю, и паровой фазы.

При понижении $\bar{\rho}$ коэффициенты скольжения частиц непосредственно за выходной кромкой уменьшаются. Массовый расход жидкой фазы при малых $\bar{\rho}$ выше, так как изменение $\bar{\rho}$ производилось путем регулирования давления полного торможения перед решеткой, а следовательно, и расхода двухфазной среды (чем меньше $\bar{\rho}$, тем выше давление полного торможения). При уменьшении коэффициентов скольжения частиц на поверхности лопатки формируется развитая пленка воды, при срыве которой образуются капли, имеющие размеры большие, чем в режимах с повышенными значениями $\bar{\rho}$. Инертность этих капель приводит к тому, что коэффициенты скольжения в этой области уменьшаются с понижением $\bar{\rho}$. Непосредственно внутри кроночного капельного следа ускорение частиц дискретной

фазы при малых $\bar{\rho}$ происходит более интенсивно. При увеличении плотности пара (уменьшении $\bar{\rho}$) повышается аэродинамическое воздействие парового потока на капли. Изменение интенсивности аэродинамического воздействия также существенно влияет на характер движения капель в ядре потока. Так, при малых значениях $\bar{\rho}$ в этой области коэффициент скольжения мелких капель близок к единице. С увеличением плотности паровой фазы потоки крупных частиц жидкой фазы смыкаются на некотором расстоянии от выходной кромки.

Применение систем лазерной диагностики потоков за решеткой позволяет сформировать обобщающие характеристики, описывающие основные кинематические параметры жидкой фазы в межосевом зазоре ступени. Эти данные важны при проектировании проточных частей последних ступеней конденсационных турбин, так как их использование дает возможность оценить кинематические параметры эрозионно-опасной жидкой фазы в этой области и интенсивность эрозионного износа, а также определить участки рабочих лопаток, наиболее подверженные сильному износу.

На рис. 15 показана зависимость коэффициента скольжения v и относительного диаметра крупных эрозионно-опасных капель $\bar{\gamma}$ от соотношения плотностей фаз и расстояния от выходной кромки $\bar{z} = z/t$ (здесь координата z откладывается от выходной кромки вдоль оси вращения турбины; t – шаг решетки) при $y_0 = 3.4\%$.

Относительное значение диаметра $\bar{\gamma}$ вычисляется по формуле

$$\bar{\gamma} = \frac{d_{cp}}{d_0},$$

где d_{cp} – средний диаметр эрозионно-опасных (диаметром более 10 мкм) капель за решеткой; d_0 – средний диаметр крупных эрозионно-опасных капель перед решеткой.

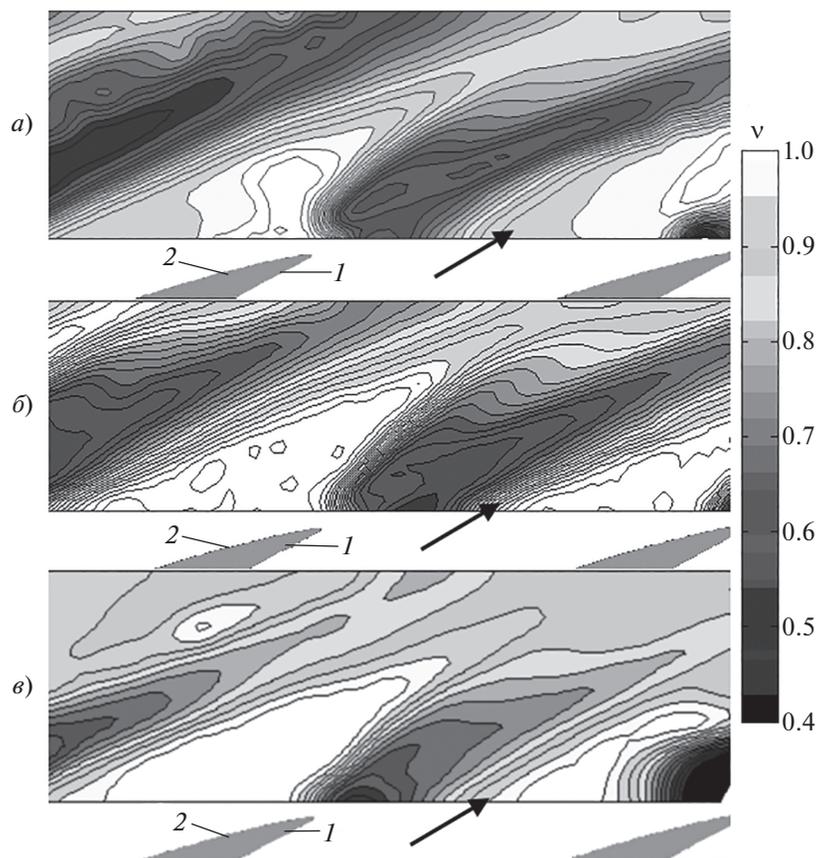


Рис. 14. Распределение коэффициентов скольжения капель за решеткой v в зависимости от отношения плотностей фаз. $\bar{\rho}$: a – 3790; b – 2581; c – 1994; 1 – вогнутая поверхность профиля; 2 – спинка профиля

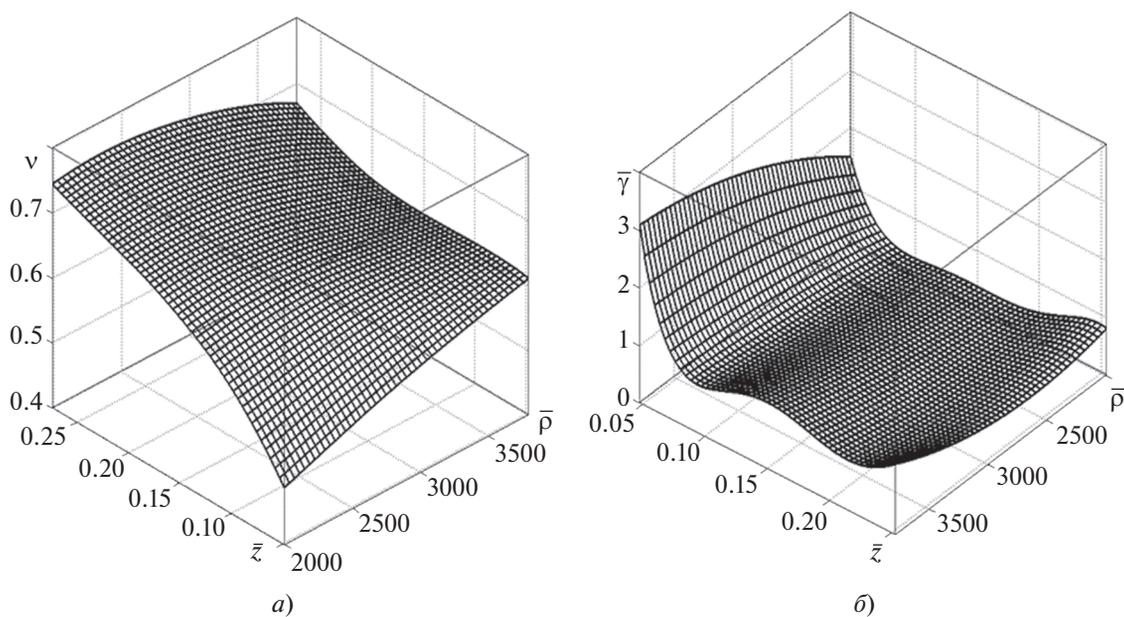


Рис. 15. Зависимость коэффициента скольжения (a) и относительного диаметра капель (b) в кромочном капельном следе от соотношения плотностей фаз и расстояния от выходной кромки

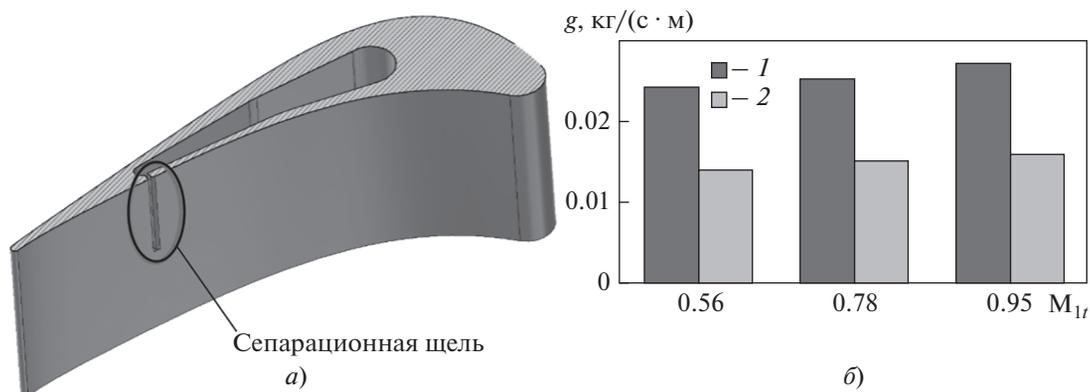


Рис. 16. Лопатка с оптимальным расположением сепарационной щели (а) и зависимость расхода пленки воды g от теоретического числа Маха M_{1r} за решеткой (б).
 1 – расход через сепарационную щель; 2 – теоретически возможный расход пленки воды из проточной части

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЛАЗЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ

Газодинамика влажно-паровых потоков – совокупность сложных термодинамических и кинематических процессов при внутрифазовом и межфазовом взаимодействиях. Как показано в [2], обобщение и формализация этих явлений требуют учета большого количества чисел подобия, которые сложно (а порой невозможно) контролировать в каждом отдельном случае. Кроме этого, полидисперсное распределение размеров капель в двухфазной среде и сложное криволинейное строение межлопаточных каналов, с которыми частицы жидкости взаимодействуют, существенно усложняют выработку универсальных подходов к исследованию, контролю или повышению эффективности работы элементов проточных частей турбомашин в условиях влажно-паровых потоков.

Применение систем лазерной диагностики потоков на экспериментальных стендах позволило лучше понять протекающие во влажно-паровых средах процессы и получить ряд технических и научных результатов, которые могут быть весьма полезны при проектировании современных паровых турбин. Была исследована и развита техническая идея по обогреву лопаток ЦНД [29, 35–37], изучены основные факторы, влияющие на процессы удаления пленки воды с поверхности лопаток [38, 39], и предложены экспериментально подтвержденные технические решения по повышению эффективности внутриканальной сепарации влаги [28, 30, 31, 38, 40, 41].

Благодаря обобщению информации о формировании и движении потоков капель были сформулированы главные требования к профилям лопаток турбомашин, обладающих повышенной сепарационной способностью и обеспечивающих эффективное оседание капель на поверхностях межлопаточных каналов сопловых лопаток

[22, 25]. Как результат обобщения всех работ, по данным экспериментальных исследований была сформирована модель, способная описывать процессы движения частиц жидкой фазы и формирования капель, а также их взаимодействия с паровой фазой и поверхностями межлопаточных каналов (включая формирование, развитие и срыв пленки воды) [10, 26, 27, 32]. Этот подход существенно расширяет возможности проектирования при разработке проточных частей турбомашин, так как позволяет определять основные параметры влажно-паровой среды на этапе проектирования ступени и оценивать эффективность принимаемых мер для снижения отрицательного воздействия влаги.

На рис. 16, 17 представлены примеры практических задач, которые были решены с использованием созданной модели движения крупных эрозионно-опасных капель. На рис. 16 показано оптимальное расположение сепарационной щели на поверхности лопатки и приведены характеристики процесса удаления влаги из проточной части в зависимости от режима работы ступени. С помощью изображения, представленного на рис. 17, можно сравнить интенсивность эрозионного износа участков профилей рабочих лопаток при внутриканальной сепарации и ее отсутствии (для сравнения интенсивность эрозионного износа оценивается по длине вектора, направленного от поверхности профиля).

Несмотря на эффективность использования систем лазерной диагностики потоков и алгоритмов определения характеристик капель (PIV/PTV) при решении задач газодинамики двухфазных сред в проточных частях турбомашин, возникают сложности, сокращающие объем полезной информации, которая может быть получена с их применением. В первую очередь это связано с качеством фотографий засвеченных капель. Негативные факторы, такие как формиро-

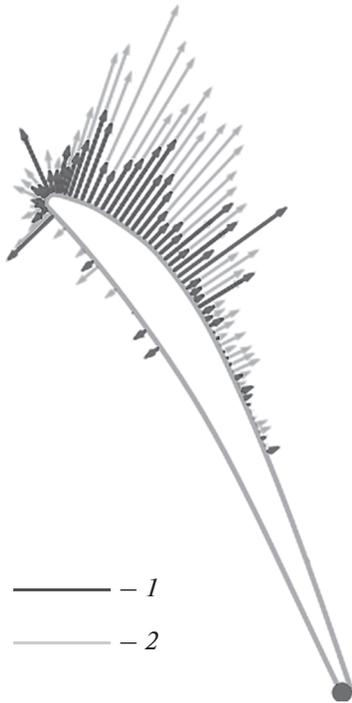


Рис. 17. Интенсивность эрозионного износа участков периферийного сечения рабочей лопатки при внутриванальной сепарации (1) и ее отсутствии (2)

вание пленок воды на оптических стеклах, интерференция и дифракция лазерного ножа, высокая концентрация капель в отдельных областях и др., существенно снижают качество фотоснимков. Как результат, для набора необходимой статистики требуется значительное увеличение объемов серий фотоматериалов для каждого режима и времени их обработки. Применяемые PIV/PTV-методы позволяют использовать классические корреляционные подходы для определения отдельных образов капель, которые построены на жестких

статистических уравнениях, не имеющих существенной гибкости при отклонении качества фотографии от допустимого уровня. Кроме того, вследствие специфики влажно-паровых потоков, описанной ранее, требуется, чтобы разработанные модели их движения работали с отдельными каплями либо с их потоками. Как результат, процесс полноценного моделирования жидкой фазы в межлопаточных каналах может занимать значительное время.

Дальнейшее развитие методов лазерной диагностики при исследованиях влажно-паровых потоков видится в использовании инструментов искусственного интеллекта и, в частности, нейронных сетей. Благодаря им появится возможность построить такую модель определения скоростей капель по фотоснимкам, которая будет способна детектировать их на “низкокачественных” визуальных картинах, характерных для влажно-паровых потоков. Применение этих подходов уже ранее было отработано в [14], где модель кластеризации использовали в целях разделения данных, которые соответствуют первичной и вторичной влаге.

Нейронные сети весьма эффективно используются для детектирования объектов и определения их характеристик в различных областях человеческой деятельности, что связано, в первую очередь, с развитием вычислительных мощностей. В области методов определения векторных полей скоростей (PIV/PTV) данные подходы в последнее время активно разрабатываются и развиваются [42, 43]. При этом для нейронных сетей важно наличие подготовленных данных (датасетов) с уже готовыми “ответами”, на которых эти методы будут способны обучаться. Общая картина процесса подготовки и использования подходов, основанных на машинном обучении, представлена на рис. 18.

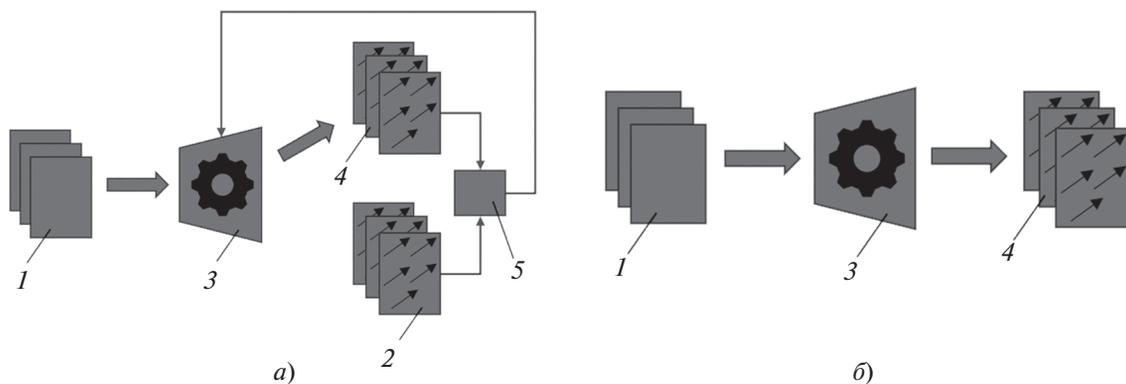


Рис. 18. Процесс работы с нейронной сетью при ее обучении (а) и использовании (б). 1 – фотографии образов капель, полученные с помощью системы лазерной диагностики потоков; 2 – известные векторные поля капель, соответствующие входным фотографиям их образов; 3 – нейронная сеть; 4 – векторные поля скоростей капель, определенные нейронной сетью по входным фотографиям; 5 – сравнение результатов работы нейронной сети с эталонными полями скоростей, определение погрешности ее работы

На первом этапе обучения (см. рис. 18, а) на вход нейронной сети Z подается часть подготовленного датасета I , состоящая из серий фотографий капельной структуры, полученных с помощью системы лазерной диагностики потоков. Нейронная сеть, “пропуская” его через себя, формирует результат своей работы — поля скоростей капель, основанные на входных данных 4 , после чего эти данные сравниваются со второй частью подготовленного обучающего датасета — соответствующими фотографиями точно определенных полей скоростей 2 . В результате вычисляется погрешность между предсказанными и реальными данными, информация о которой направляется в нейронную сеть для пересчета весовых коэффициентов. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность. Применение нейронной сети после окончания обучения заключается в подаче на ее “вход” фотографий капельной структуры и получении на выходе данных о полях скоростей (см. рис. 18, б).

Главная проблема внедрения методов, основанных на нейронных сетях, — необходимость большого объема данных в обучающих датасетах. Нарботанные за долгие годы результаты применения системы лазерной диагностики позволяют сформировать достаточно объемные датасеты, которые способны обучить нейронные сети для применения их при исследовании влажно-паровых потоков.

ВЫВОДЫ

1. Установлены зоны присутствия потоков крупных эрозионно-опасных капель за сопловыми решетками паровых турбин и их источники. Проанализировано влияние параметров потока (начальной влажности, отношения плотностей фаз) на характеристики капель в этих областях.

2. Выявлены процессы, влияющие на движение влаги в межлопаточных каналах сопловых решеток турбомашин. Определены области генерации основных потоков крупных эрозионно-опасных капель, формирующих капельную структуру перед рабочими лопатками.

3. Данные, полученные с помощью систем лазерной диагностики потоков, позволили разработать профиль сопловой лопатки с повышенной сепарационной способностью, отработать и успешно применить подходы к разработке систем внутриканальной сепарации с точки зрения оптимизации положения и режимов работы сепарационных щелей, создать численную полуэмпирическую модель, описывающую процессы генерации крупных эрозионно-опасных капель, их движения и взаимодействия с поверхностями межлопаточных каналов.

4. Системы лазерной диагностики потоков должны развиваться с применением современ-

ных подходов к обработке изображений, основанных на методах глубокого машинного обучения в виде нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А.** Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А.** Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981.
3. **Дейч М.Е.** Газодинамика решеток турбомашин. М.: Энергоатомиздат, 1996.
4. **Филиппов Г.А., Поваров О.А., Пряхин В.В.** Исследование и расчеты турбин влажного пара. М.: Энергия, 1973.
5. **Филиппов Г.А., Поваров О.А.** Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980.
6. **Влияние влажности на экономичность паровых турбин / Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, А.С. Лисянский // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 96–107.**
7. **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 // *J. Turbomach.* 1988. V. 110. No. 2. P. 163–172. <https://doi.org/10.1115/1.3262176>
8. **Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Игнатьевский Е.А.** Анализ конденсации пересыщенного пара в турбинных ступенях // *Теплоэнергетика.* 1970. № 12. С. 22–26.
9. **Кирюхин В.И.** Исследование структуры влажного пара в многоступенчатой турбине // *Теплоэнергетика.* 1975. № 5. С. 23–25.
10. **Tishchenko V., Alekseev R.** Numerical modeling of the mechanism of coarse droplets deposition on surfaces of a steam turbine nozzle blade cascade // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1128. P. 012137. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012137>
11. **Experimental studies of polydispersed wet steam flows in a turbine blade cascade / G. Filippov, V. Gribin, A. Tishchenko, I. Gavrilov // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy.** 2014. V. 228. No. 2. P. 168–177. <https://doi.org/10.1177/0957650913518768>
12. **Тищенко В.А.** Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы влажно-парового потока в элементах проточных частей турбомашин: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2014.
13. **Гаврилов И.Ю.** Определение влияния начального состояния пара на волновую структуру и параметры двухфазного потока в сопловой турбинной решетке: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2014.
14. **Features of liquid phase movement in the inter-blade channel of nozzle blade cascade / V. Gribin, I. Gavrilov, A. Tishchenko, V. Tishchenko, V. Popov, S. Khomyakov, R. Alexeev // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy.** 2018. V. 232. Is. 5. P. 452–460. <https://doi.org/10.1177/0957650917730947>
15. **Controlling the coarse droplets streams by blade profile shape modification in the last stages of steam turbines / V. Tishchenko, R. Alexeev, I. Gavrilov, V. Gribin, A. Tishchenko // J. Phys.: Conf. Ser.** 2017. V. 899.

- No. 3. P. 032022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/3/032022>
16. **Moore M.J., Sieverdin C.H.** Two-phase steam flow in turbines and separators. Washington, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
 17. **Petr V., Kolovratnik M.** Wet steam energy loss and related Baumann rule in low pressure steam turbines // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy. 2014. V. 228. No. 2. P. 206–215.
<https://doi.org/10.1177/0957650913512314>
 18. **Дробление** пленок влаги на сходе с кромок сопловых лопаток паровых турбин / И.И. Кириллов, И.П. Фаддеев, В.Н. Амелюшкин, А.Л. Шубенко // ИФЖ. 1968. Т. 15. № 1. С. 85–90.
 19. **Application** of PTV method for investigation of polydisperse wet steam flow / R.A. Alekseev, V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, V.A. Tishchenko, V.V. Popov // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1128. No. 1. P. 012093.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1128/1/012093>
 20. **Experimental** study of the features of the motion of liquid-phase particles in the interblade channel of the nozzle array of a steam turbine / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, V.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, I.Yu. Sorokin, R.A. Alekseev // Power Technol. Eng. 2017. V. 51. No. 7. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1007/s10749-017-0788-x>
 21. **Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А.** Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7. № 3. P. 79–85.
 22. **Optimization** of stator blade profile design for last stages of steam turbines based on the features of coarse droplets movement in inter-blade channels / R.A. Alekseev, V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, V.A. Tishchenko, V.V. Popov // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1359. P. 012137.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012038>
 23. **Методика** бесконтактного определения средних размеров эрозионно-опасных капель в полидисперсном влажно-паровом потоке / И.Ю. Гаврилов, В.В. Попов, И.Ю. Сорокин, В.А. Тищенко, С.В. Хомяков // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 39–46.
<https://doi.org/10.1134/S0040363614080074>
 24. **Попов В.В.** Результаты расчетно-экспериментального исследования влияния сепарации на характеристики жидкой фазы за сопловой турбинной решёткой: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2017.
 25. **Применение** параметрического метода для профилирования межлопаточных каналов сопловых решеток осевых турбомашин / В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, Р.А. Алексеев, В.А. Тищенко, И.Ю. Гаврилов, В.В. Попов // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 50–57.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620080020>
 26. **Тищенко В.А., Алексеев Р.А., Гаврилов И.Ю.** Модель движения эрозионно-опасных капель в межлопаточных каналах паровых турбин // Теплоэнергетика. 2018. № 12. С. 35–44.
<https://doi.org/10.1134/S004036361812010X>
 27. **Тищенко В.А., Алексеев Р.А.** Численное моделирование процессов образования и движения водяной пленки и эрозионно-опасных капель в проточных частях паровых турбин // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 72–81.
<https://doi.org/10.1134/S0040363619110055>
 28. **Experimental** studies of liquid film suction from turbine stator blade surface in wet steam flow / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, S.V. Khomyakov, V.V. Popov, V.A. Tishchenko, I.Yu. Sorokin // Proc. of the 11th European Conf. on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics: ETC 11. Madrid, Spain, 23–27 March 2015. P. 1–10.
 29. **Experimental** study of the efficiency of steam injection on wet-steam turbine stator blade cascade / S.V. Khomyakov, R.A. Alekseev, I.Y. Gavrilo, V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, V.A. Tishchenko, V.V. Popov // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. No. 1. P. 012256.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012256>
 30. **Experimental** study of intrachannel separation in a flat nozzle turbine blade assembly with wet stream flow / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, V.V. Popov, I.Yu. Sorokin, V.A. Tishchenko, S.V. Khomyakov // Power Technol. Eng. 2016. V. 50. No. 2. P. 180–187.
<https://doi.org/10.1007/s10749-016-0680-0>
 31. **An experimental** study of the integral characteristics of the intrachannel liquid film suction in a turbine stator blades cascade / V.G. Gribin, V.A. Tishchenko, V.V. Popov, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilo, R.A. Alekseev // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1675. No. 1. P. 012028.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012028>
 32. **Моделирование** потоков влажного пара в сопловой турбинной решетке / В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, И.Ю. Гаврилов, В.А. Тищенко, В.В. Попов, Р.А. Алексеев // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 8–20.
 33. **Results** of the international wet steam modeling project / J. Starzmann, F.R. Hughes, S. Schuster, A.J. White // Proc. Inst. Mech. Eng. Part A: J. Power Energy. 2018. V. 232. No. 5. P. 550–570.
<https://doi.org/10.1177/0957650918758779>
 34. **Влияние** режимных параметров паротурбинной установки на характер распределения потоков частиц жидкой фазы за изолированной сопловой решеткой во влажно-паровом потоке / В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, И.Ю. Гаврилов, В.А. Тищенко, И.Ю. Сорокин, В.В. Попов, С.В. Хомяков // Промышленная энергетика. 2015. № 11. С. 30–36.
 35. **Performance** of a wet-steam turbine stator blade with heating steam injection / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, S.V. Khomyakov, I.Yu. Gavrilo, V.A. Tishchenko, V.V. Popov, I.Yu. Sorokin, R.A. Alekseev // Proc. of the 12th European Conf. on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics: ETC 12. Stockholm, Sweden, 3–7 April 2017. P. 1–11.
<https://doi.org/10.29008/ETC2017-312>
 36. **Влияние** вдува пара на характеристики сопловой решетки, работающей в условиях влажно-парового потока / Г.А. Филиппов, В.Г. Грибин, А.А. Тищенко, И.Ю. Гаврилов, В.А. Тищенко, С.В. Хомяков, В.В. Попов, И.Ю. Сорокин // Теплоэнергетика. 2016. № 4. С. 3–8.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616040020>
 37. **An experimental** study of influence of the steam injection on the profile surface on the turbine nozzle cascade performance / V. Gribin, A. Tishchenko, A. Lisyansky, A. Nekrasov // Proc. of ASME Turbo Expo. Düssel-

- dorf, Germany, 16–20 June 2014. V. 1B.
<https://doi.org/10.1115/GT2014-27118>
38. **Numerical** simulation of the liquid film suction process through the slots of various geometry in the last stages of steam turbines / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, R.A. Alekseev, I.Yu. Gavrilov, V.V. Popov, V.A. Tishchenko // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. No. 1. P. 022068.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022068>
39. **The main** flow parameters characterising the liquid film suction process on the blade surface in a steam turbine / V.G. Gribin, V.A. Tishchenko, V.V. Popov, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilov, R.A. Alekseev // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1675. No. 1. P. 012029.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012029>
40. **Application** of numerical modelling for determining the optimal position of the suction slot in the steam turbine vane cascade / V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, R.A. Alekseev, I.Yu. Gavrilov, V.V. Popov, V.A. Tishchenko // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1683. No. 1. P. 022067.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022067>
41. **Investigation** of the influence of intra-channel liquid film suction on the structure of the droplet flow downstream a stator blades cascade of a steam turbine / R.A. Alekseev, V.G. Gribin, A.A. Tishchenko, I.Yu. Gavrilov, V.A. Tishchenko, V.V. Popov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1359. No. 1. P. 012024.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012024>
42. **DeepPTV**: particle tracking velocimetry for complex flow motion via deep neural networks / Jiaming Liang, Shengze Cai, Chao Xu, Tehuan Chen, Jian Chu // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2022. V. 71. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1109/tim.2021.3120127>
43. **Particle** identification in particle tracking velocimetry using two-stage neural networks / Jiaming Liang, Xiaoqi Liu¹, Tehuan Chen, Changchun Pan, Chao Xu // *J. Ind. Manage. Optim.* 2023. V. 19. No. 7. P. 5331–5352.
<https://doi.org/10.3934/jimo.2022175>

Experience with Application of Laser Diagnostics Systems in Experimental Studies of Wet Steam Flows in the Flow Path of Turbomachines: Basic Results of Studies and System Development Trends

V. A. Tishchenko^a, A. A. Tishchenko^{a, *}, V. G. Gribin^a, V. V. Popov^{a, **},
 I. Yu. Gavrilov^a, K. A. Berdyugin^a, and D. G. Sokolov^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRE MPEI), Moscow, 111250 Russia

*e-mail: TishchenkoAA@mpei.ru

**e-mail: PopovVitV@mpei.ru

Abstract—The findings in application of laser diagnostic systems for the investigation of wet steam flows in flow paths of steam turbines, specifically, in channels of various configurations, are reviewed. The experimental results accumulated over more than a decade enabled the authors to generalize and formulate the essential features of the movement of coarse erosion-hazardous droplets downstream of turbine cascades and in interblade channels. The regions with liquid phase particles are found using the data of visual analysis. The results of application of the particle image velocimetry/particle tracking velocity (PIV/PTV) methods, which implement algorithms for determining vector fields of particle velocities, are presented. The features of the distribution of kinematic characteristics of the liquid phase in various regions of turbine cascades, which affect the erosion wear rate, are discussed. Data are presented on the effect of the blade profile on the formation of trajectories of droplet flows, and methods for improving the separation ability of a blade operating in a wet steam flow are proposed. Using the experimental database on liquid phase velocity fields in turbine channels of various configurations, a semiempirical model of the flow of large erosive-dangerous droplets is formulated. It describes their movement in a cocurrent steam flow and interaction with the walls of the interblade channels. A review is presented of engineering solutions that were obtained on the basis of theoretical and experimental studies of wet steam flows using laser diagnostic systems. The concept of blade surface heating, heating steam jet injection, and optimization of the in-channel separation system is examined. The principles are formulated for the development of approaches based on laser flow diagnostic systems in the field of application of neural networks, which should considerably extend the capabilities of experimental studies since they offer the potential for increasing the amount of data obtained by implementing such experimental methods.

Keywords: steam turbines, turbine cascade, erosion-hazardous droplets, two-phase hydrodynamics, neural networks, droplet trajectories, cocurrent steam flow