

на правах рукописи

Сидоров Александр Андреевич



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОГАЗОВЫХ ПОТОКОВ  
В РАСШИРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ  
ПРИ НАЛИЧИИ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ

Специальность: 05.04.03 – «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на кафедре низких температур.

**Научный руководитель:** **Ястребов Арсений Константинович**

кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Официальные оппоненты:** **Солодов Александр Павлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Галаев Сергей Александрович**

кандидат технических наук, доцент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**Ведущая организация:** ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие "Турбоконт"

Защита диссертации состоится 10 декабря 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета МЭИ.011 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.13, корп. М, ауд. М-412.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МЭИ.011  
кандидат технических наук



А.К. Ястребов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Серьезной проблемой машин и аппаратов расширительного типа является износ проточной части вследствие эрозии, вызванной бомбардировкой рабочих поверхностей образовавшимися в объеме каплями. Современные типовые методы расчета эффектов кавитации и объемной конденсации либо не позволяют учитывать наличие данных эффектов и степень их влияния на характеристики потока и проточную часть агрегатов на этапе проектирования, либо имеют достаточно малую точность и являются лишь инструментом вероятностного предсказания. Зачастую проблема объемной конденсации в турбоагрегатах решается установкой крупногабаритных и дорогостоящих систем очистки поступающего в агрегат рабочего тела для уменьшения объема паровой фазы. Для уменьшения или исключения влияния фазовых переходов эмпирическими методами определяются специальные режимы работы агрегата, которые в некоторых случаях не позволяют ему выходить на номинальные характеристики. Однако и эти решения не всегда приводят к полному исключению последствий от вышеназванных эффектов, что требует замены дорогостоящих деталей.

Современные методы конечно-объемного моделирования имеют ряд преимуществ по сравнению с типовыми одномерными методами расчетов проточных частей машин и аппаратов, применяющимися в настоящее время. К числу таких преимуществ можно отнести большую точность результатов, большую вариативность в постановке граничных и начальных условий, возможность учета влияния изменения геометрии проточной части на тепломассоперенос, а также существенно большую наглядность получаемых результатов, по сравнению с аналитическими методами.

Для турбомашиностроительной отрасли актуальна разработка нового подхода к учету объемной конденсации в потоках многокомпонентных парогазовых смесей в машинах и аппаратах криогенной техники. В настоящей работе для решения этой сложной задачи предлагается совместное использование моментного метода для решения кинетического уравнения для функции распределения капель по массам или размерам и методов конечно-объемного моделирования в трехмерной постановке. Новый подход позволяет учитывать степень влияния объемной конденсации на характеристики потока и проточную часть на этапе проектирования турбоагрегатов, что, в свою очередь, в дальнейшем может позволить снизить скорость и степень износа проточной части машин и аппаратов путем оптимизации формы деталей и подбора материалов, а также даст явный экономический эффект вследствие отказа от использования дорогостоящих фильтрующих устройств в установках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-38-90247 «Комплексный подход к исследованию объемной конденсации при расширении многокомпонентных и многофазных потоков в машинах и аппаратах криогенной техники» конкурса «Аспиранты»).

**Цель диссертационной работы** заключается в разработке модели объемной конденсации, основанной на решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерной нестационарной постановке, а также оценка влияния объемной конденсации на эффективность и элементы проточной части машин и аппаратов криогенной техники.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

- разработка модели объемной конденсации на основе решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерной нестационарной постановке, а также программная реализация данной модели в виде специального модуля для интеграции в расчетный CFD-пакет;
- проверка модели объемной конденсации на примере задачи об истечении парогазовой смеси через сопло путем сравнения с экспериментальными данными других авторов;
- проверка модели термогазодинамики применительно к задаче о расширении газа в проточной части турбодетандерного агрегата методами CFD (для конкретной конструкции ступени) путем сравнения с экспериментальными данными других авторов;
- решение задачи истечения парогазовой смеси в ступени проточной части турбодетандерного агрегата с применением модели объемной конденсации, определение степени влияния объемной конденсации на эффективность ступени и элементы проточной части.

**Научная новизна** полученных в ходе исследования результатов заключается в следующем:

- разработана модель объемной конденсации, основанная на решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерном нестационарном виде. Модель реализована в виде подгружаемого в CFD-пакет специального программного модуля;
- для описания кинетики конденсации использовано кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам в трехмерном нестационарном виде;
- решена задача о сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло с применением модели объемной конденсации в двумерной и трёхмерной стационарной и нестационарной постановках, с учетом образования капель и их роста;
- решена нестационарная задача о расширении потока газа с примесями в проточной части ступени турбодетандерного агрегата с применением модели объемной конденсации в трёхмерной постановке с учетом образования капель и их роста.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что использованные подходы и сформулированные в ходе исследования методики могут быть применены:

- для исследования объемной конденсации в парогазовых потоках в расширительных устройствах криогенной техники;



- для априорной локализации областей фазовых переходов в проточных частях расширительных устройств в ходе проектирования;
- для априорной оценки влияния конденсационного аэрозоля на проточную часть с точки зрения вероятности эрозийного износа на ранних этапах проектирования агрегатов.

**Обоснованность и достоверность выводов** обеспечивается сравнением полученных результатов с надежными экспериментальными данными разных авторов, корректным использованием расчетного CFD-пакета и его допустимой модернизацией.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

- модель конденсации, основанная на решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерном нестационарном виде, а также реализация данной модели в виде специального программного модуля для интеграции в CFD-пакет;
- результаты численного исследования объемной конденсации при сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло в двух- и трехмерной постановках, с учетом образования капель и их роста;
- результаты численного исследования объемной конденсации при расширении потока газа с примесями в проточной части ступени турбодетандерного агрегата в трёхмерной постановке, с учетом образования капель и их роста.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

- XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», 22-26 мая 2017 г.;
- международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», 09-11 октября 2017 г.;
- XXIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 15-16 марта 2018 г.;
- седьмой российской национальной конференции по теплообмену. Москва, 22-26 октября 2018 г.;
- XXVI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 12 – 13 марта 2020 г.;
- III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», 19–23 октября 2020 г.;
- XXVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 11 – 12 марта 2021 г.

#### **Публикации**

Основное содержание диссертации изложено в 15 публикациях, в том числе в 3 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Scopus; в 1 статье в ведущем российском рецензируемом научном журнале и издании, входящем в Перечень ВАК России; а также в 11 публикациях в

сборниках трудов и тезисов докладов международных и российских конференций.

**Личный вклад автора** в получение результатов, изложенных в диссертации. Соискателем лично получены следующие результаты:

- проведен анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований как по тематике объемной конденсации в потоках, так и в целом по конечнообъемному моделированию расширительных машин и аппаратов криогенной техники;
- разработана модель объемной конденсации, основанная на решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерном нестационарном виде. Модель реализована в виде специального программного модуля, с последующей интеграцией в расчетный пакет;
- модель объемной конденсации проверена на двух наборах экспериментальных данных разных авторов для задачи истечения парогазового потока из сопла;
- подготовлена и проверена модель термогазодинамики на одном наборе экспериментальных данных для конкретной конструкции ступени турбодетандерного агрегата;
- произведены расчеты и получены результаты исследования расширения смешанного рабочего тела в проточной части ступени турбодетандерного агрегата без учета и с учетом объемной конденсации.

#### **Структура и объем диссертации**

Материалы диссертации изложены на 155 страницах основного текста, включающих 69 рисунков и 10 таблиц. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 65 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, указана апробация результатов работы.

**В первой главе** приводится обзор источников, характеризующих современное состояние двух направлений: исследований объемной конденсации, а также применение CFD-пакетов в расчетах термогазодинамики проточных частей турбодетандерных агрегатов. При рассмотрении темы объемной конденсации можно выделить две научные школы – отечественную, направленную на теоретические изыскания и зарубежную, в большей степени ориентированную на экспериментальные исследования. Исследование объемной конденсации было и остается актуальным направлением исследований фазовых переходов ввиду особого распространения данного явления в науке и технике. При рассмотрении темы применения конечнообъемных пакетов показано, что CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics) активно используется для исследования термогазодинамики, а также для оптимизации проточных частей ступеней

турбодетандерных агрегатов как в качестве самостоятельного инструмента для проектирования, так и для проведения поверочных и научно-ориентированных расчетов. Ввиду сложности проведения экспериментальных исследований, а также отсутствия в открытом доступе информации по проточным частям и режимным картам, работы посвященные CFD-исследованиям, как правило, не опираются на экспериментальные исследования, и по большей части либо не верифицируются, либо верифицируются по результатам аналитических расчетов, в отличие от настоящей работы.

**Во второй главе** приведены основные теоретические выкладки, необходимые для описания кинетики конденсации. Так, дан вывод основного кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам:

$$\frac{\partial f_v}{\partial t} + \text{div}(f_v \vec{V}) + \frac{\partial}{\partial r}(r \dot{f}_v) = I \delta(r - r_{kp}), \quad (1)$$

где  $f_v$  – функция распределения капель по размерам,  $r$  – радиус капель,  $\dot{f}_v$  – скорость роста капель,  $I$  – скорость нуклеации,  $r_{kp}$  – критический радиус,  $\delta$  – дельта-функция Дирака.

Также в главе приводятся выражения для скорости роста капель, скорости нуклеации и критического радиуса. На основе кинетического уравнения сформулирована система моментных уравнений:

$$\frac{d\Omega_n}{dt} = n \dot{r} \Omega_{n-1} + I r_{cr}^n - \nabla \vec{v} \Omega_n. \quad (2)$$

Далее эта система была адаптирована к расчетным особенностям CFD-пакета. Решение полученной системы для первых четырех моментов  $n=0..3$ , позволяет получить основные характеристики конденсационного аэрозоля: числовую плотность капель, средний размер капель, площадь поверхности всех капель, массовую долю конденсата и пр.

В главе также приводится описание интегрируемого в CFD-пакет модуля, позволяющего решать систему указанную выше систему (2). Модуль представляет собой алгоритм, реализуемый посредством пользовательских функций UDF (User Defined Function), базирующийся на использовании UDM (User Defined Memory) – дополнительных ячеек пользовательской памяти, в которые загружаются результаты работы, пригодные для последующей постобработки.

Алгоритм работы модуля решения системы моментных уравнений выглядит следующим образом: после подгрузки модуля в решатель в каждой расчетной ячейке на каждом шаге по времени (для нестационарного решателя) или на каждой итерации (для стационарного решателя) производится расчет числа Маха  $M$  (в случае учета только сверхзвуковой конденсации). Если полученное значение превышает единицу, т.е. течение сверхзвуковое, проверяется условие наличия в данной ячейке паровой фазы (объемная доля пара  $C(\text{var})$  должна быть больше нуля). Если паровая фаза присутствует, то определяется степень пересыщения  $s$ , и если при этом пар является пересыщенным, то выполняется расчет скорости нуклеации капель  $I$ , критического радиуса  $r_{kp}$  и скорости роста капель

$\dot{r}$ . Эти величины используются для решения системы моментных уравнений, по результатам решения моментных уравнений выполняется расчет источниковых членов  $S_e$  и  $S_m$ , величины которых, в свою очередь, передаются в решатель. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет либо прекращен пользователем, либо по достижении заданной точности.

С помощью объемных источниковых членов энергии и массы можно существенно упростить алгоритм решения. Так, объемный источник массы  $S_m$  представляет собой сумму двух слагаемых. Первое слагаемое  $S_{m1}$  отвечает за прирост массы вследствие образования капель, а второе  $S_{m2}$  – за прирост массы вследствие их роста в процессе объемной конденсации:

$$S_m = S_{m1} + S_{m2} = 4\pi\rho_l \left( \rho\dot{r} \frac{\Omega_2}{\rho} + \frac{1}{3} r_{cr}^3 I \right), \quad (3)$$

где  $\Omega_2$  – второй момент функции распределения капель по размерам. Объемный источник энергии  $S_e$  определяется как произведение источника массы и теплоты парообразования:

$$S_e = S_{e1} + S_{e2} = S_m L(T), \quad (4)$$

где  $L(T)$  – теплота парообразования.

**В третьей главе** показан пример применения модели объемной конденсации в виде специально разработанного программного модуля, интегрируемого в CFD-пакет для решения задачи об истечении парогазовой смеси через сопла различных профилей в двумерной и трехмерной постановках. Приводится математическое описание процесса, включающее зависимости теплофизических свойств компонентов рабочего тела от температуры. Дается оценка учета влияния роста капель на характер процесса, проверяется работа модуля в стационарной и нестационарной постановке, а также производится сравнение с двумя наборами экспериментальных данных.

Постановка задачи выглядит следующим образом: рассматривается сверхзвуковое истечение парогазовой смеси, состоящей из паров конденсирующегося компонента и газообразного азота  $N_2$  в качестве газа-носителя, через плоское щелевое сопло специального профиля в двумерной и/или трехмерной постановках. В первом случае в качестве конденсирующегося компонента принимаются пары тяжелой воды  $D_2O$ , а во втором случае пары обычной воды. Выбор компонентов обусловлен наличием экспериментальных данных.

Математическое описание истечения парогазовой смеси через сопло включает в себя систему уравнений, состоящую из уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, а также уравнения диффузии и уравнения состояния для идеального газа. Ударные волны не моделируются, поэтому объемная вязкость не учитывается в уравнениях движения.

Одна из важнейших характеристик, требуемых для моделирования объемной конденсации – зависимость давления насыщения от температуры. Несмотря на то, что тяжелая вода хорошо изучена и активно применяется в атомной

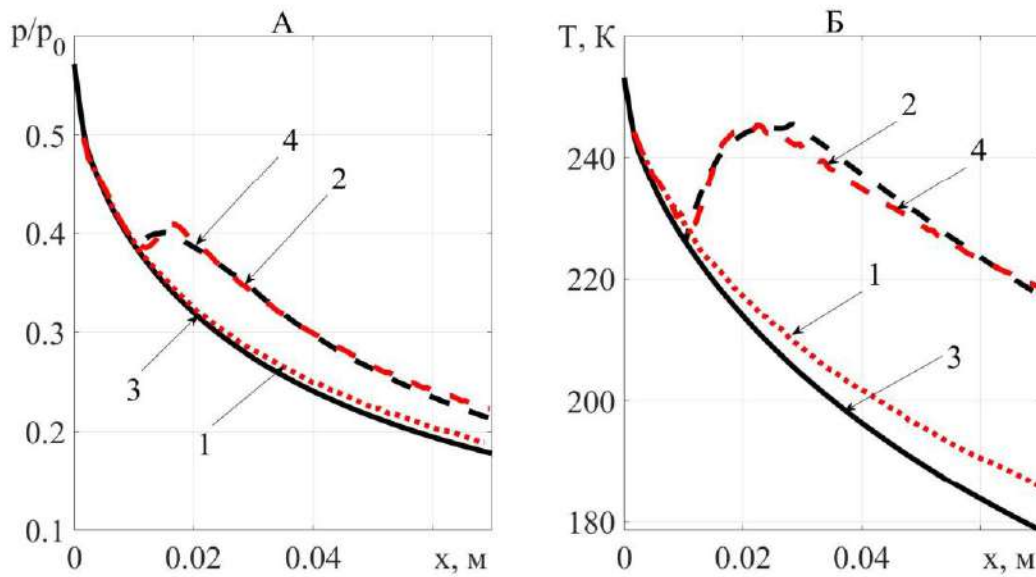


промышленности, кривые на линии насыщения в литературе представлены скудно. Так, применяется зависимость следующего вида:

$$\ln[p_s(T)] = A + BT_k^{-1} + C \ln(T_k) + DT_k, \quad (5)$$

где  $T_k$  – температура в К, коэффициенты:  $A = 95.700020$ ,  $B = -8439.470752$ ,  $C = -13.486506$ ,  $D = 0.012010$ .

На рисунке 1 представлены распределения относительного давления  $p/p_0$  и температуры вдоль центральной линии сопла. Используются следующие обозначения кривых: 1 и 3 – экспериментальные<sup>1</sup> и расчетные данные для течения газа без конденсации, 2 и 4 – экспериментальные и расчетные данные при истечении парогазовой смеси с учетом конденсации.



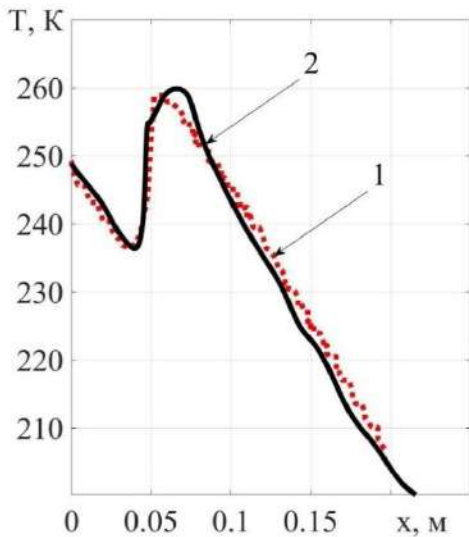
**Рисунок 1.** А – распределение относительного давления  $p/p_0$  вдоль центральной линии, Б – распределение температуры вдоль центральной линии.

Наблюдается как качественное, так и хорошее количественное согласование данных. Так, в зоне активной конденсации, которая характеризуется локальным повышением давления и температуры отличие от экспериментальных данных незначительное и не превышает 3%. Однако для изоэнтропийного процесса (без учета конденсации) отчетливо видно различие по температурам. Это может быть объяснено некоторыми отличиями реального профиля сопла в эксперименте и в расчетах.

Для дополнительной проверки модели конденсации, а также специального программного модуля рассматривается также второй набор экспериментальных данных<sup>2</sup>. Сравнение приводится по распределению температуры вдоль центральной линии сопла.

<sup>1</sup> Н. Pathak, S. Tanimura. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. //Aerosol Science and Technology, 47:1310–1324, 2013.

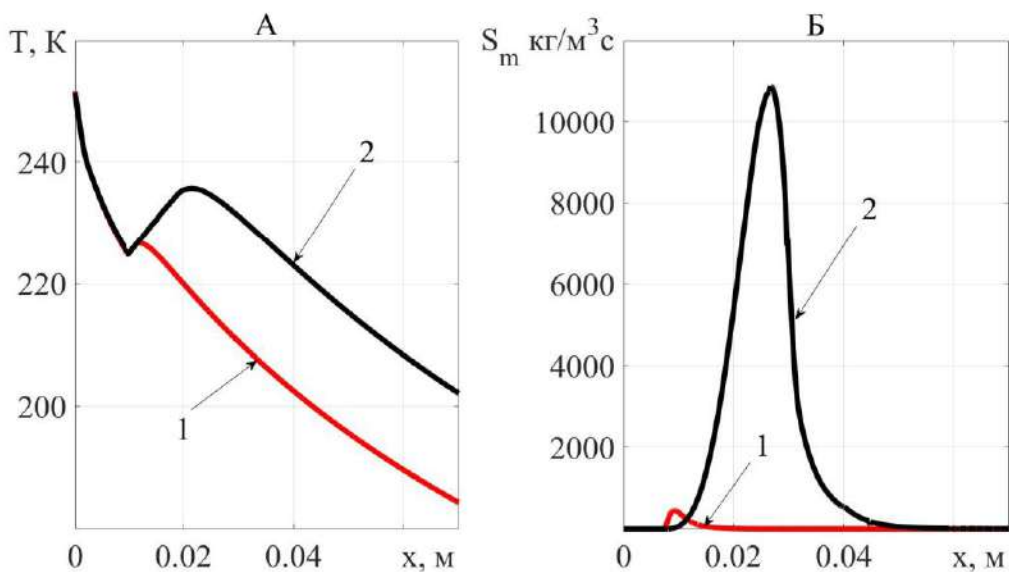
<sup>2</sup> G. Lamanna. On nucleation and droplet growth in condensing nozzle flows // Technische Universiteit Eindhoven, 2000.



**Рисунок 2.** Распределение температуры вдоль центральной линии сопла. 1 – экспериментальные данные, 2 – результат CFD-моделирования.

Из рисунка 2 видно, что, как и в случае с предыдущим профилем сопла, наблюдается хорошее качественное и количественное согласование данных. Лучшее согласование наблюдается в области начала активной конденсации (область, в которой температура потока начинает резко расти), а также при переходе к изэнтропийному процессу, т.е. уже после завершения процесса конденсации. Максимальное различие данных составляет не более 5%, что сопоставимо с погрешностью численного метода.

Дополнительно исследуется степень влияния роста капель на характер процесса. Для этого было проведено два расчета: в первом случае источникные члены (3) и (4) состояли только из слагаемого, отвечающего за образование капель, а во втором случае учитывались оба слагаемых – и отвечающее за образование капель и за их рост.



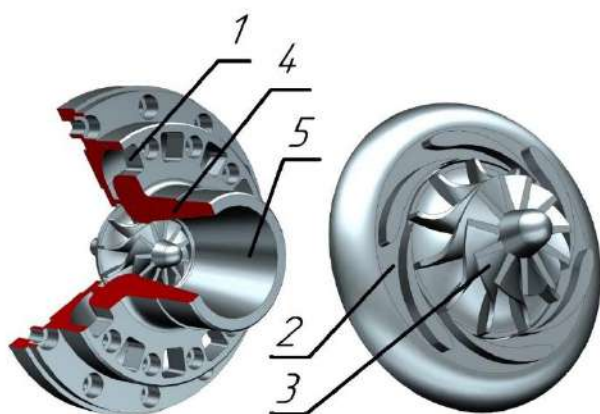
**Рисунок 3.** А – распределение температуры вдоль центральной линии сопла, Б – распределение величины массового источникного члена вдоль центральной линии сопла. 1 – без учета роста капель, 2 – с учетом.

Из представленных на рисунке 3 распределений видно, что, во-первых, источникные члены с учетом и без учета роста капель отличаются в десятки раз, при этом максимум источникного члена без учета роста капель примерно равен  $450 \text{ кг}/(\text{м}^3\text{с})$ , в то время как с учетом роста капель – около  $10850 \text{ кг}/(\text{м}^3\text{с})$ . Во-вторых, это сильно влияет на термодинамику процесса, что видно из распределений температуры: при решении задачи с учетом роста капель поток вследствие



тепловыделения в процессе конденсации нагрелся существенно (отличие составило не менее 12 К), так как источник энергии есть производство величины массового источникового члена на теплоту парообразования.

**Четвертая глава** посвящена применению расчетного CFD-пакета к решению нестационарной задачи о расширении газообразного гелия в проточной части ступени турбодетандерного агрегата в трехмерной постановке. Задача решается в рамках CFD-моделирования, основанного на использовании метода конечных объемов в трехмерной постановке с учетом утечек (газа, покидающего ступень) и перетечек (газа, не совершающего полезной работы) рабочего тела. Предполагается, что теплообмен с окружающей средой отсутствует.



**Рисунок 4.** Трехмерная модель ступени турбодетандерного аппарата

Математическое описание включает в себя систему уравнений, состоящую из уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, усредненных по Рейнольдсу и Фавру, уравнения состояния, а также уравнения турбулентности для замыкания системы. Ударные волны не моделируются, поэтому объемная вязкость в уравнениях движения не учитывается. В отличие от предыдущей главы, в данной главе используется уравнение состояния Редлиха – Квонга, так как применение уравнений состояния идеального газа показало недостаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными. В качестве модели турбулентности выбрана обновленная  $k-\omega$  модель турбулентности, так как она показала наилучшую устойчивость при расчётах сжимаемых течений.

Для оценки эффективности ступени турбодетандерного агрегата рассматривается изоэнтروпийный КПД, который является мерой приближения реального процесса расширения к идеальному. Для его определения необходимо располагать значениями действительного и располагаемого теплоперепада (холодопроизводительности), т.е. изменения энтальпии (равного работе, так как теплообмен с окружающей средой не рассматривается) в реальном и идеальном (изоэнтропийном) процессах. Таким образом, изоэнтропийный КПД рассчитывается как

$$\eta_s = \frac{h_{\text{хол}}}{h_s} = \frac{h_n - h_k}{h_s}, \quad (6)$$

где  $h_{\text{хол}}$  – холодопроизводительность;  $h_s$  – располагаемый теплоперепад;  $h_n$  и  $h_k$  – значения энтальпии в начальной и конечной точках процесса расширения.

Трехмерная модель ступени турбодетандерного агрегата приведена на рисунке 4. Принцип ее работы довольно хорошо известен: газ через входные отверстия 1 поступает в направляющий аппарат 2, после чего, расширяясь, совершает

работу, вращая рабочее колесо с определенной частотой, а затем через диффузор 4 попадает в выходное отверстие 5 и далее в магистраль (не показана).

После преобразования трехмерной модели к расчетному виду, т.е. выделению модели проточной части, она разбивается на элементарные объемы, совокупность которых является расчетной сеткой. При этом пограничный слой учитывается в виде дополнительного призматического подслоя вблизи стенок. Поскольку модель проточной части состоит из нескольких тел, между ними дополнительно настраиваются интерфейсы – две поверхности, находящиеся в непосредственном контакте при движении, между которыми происходит обмен данными. Следующим этапом выступает исследование сеточной сходимости. Так, учитывая, что основная задача ступени турбодетандерного агрегата - понижение температуры рабочего тела при совершении полезной работы, при исследовании влияния качества разбиения расчетной области на элементарные объемы главным ориентиром была сходимость по температуре за диффузором. Также немаловажным является исследование сеточной сходимости в пристеночной области, т.к. при определении характеристик потока в пограничном слое модели турбулентности весьма чувствительны к значению  $y^+$ . Считается, что для модернизированной  $k-\omega$  модели необходимо обеспечить  $y^+$  на уровне  $<1$ , что было обеспечено при подготовке расчетной сетки.

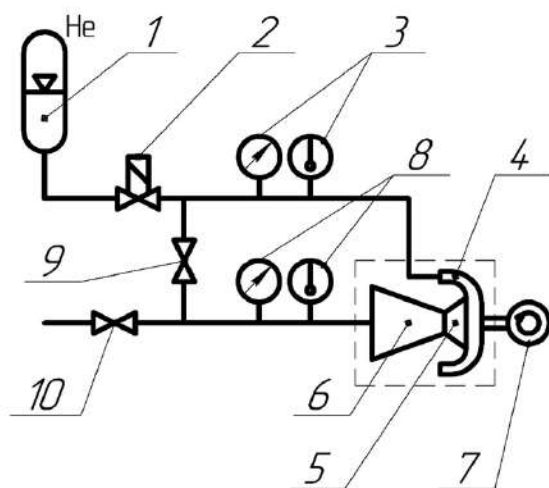
В отличие от сравнения с экспериментальными данными для простых форм каналов, которые могут быть воспроизведены без существенных проблем, для верификации модели для расчета течения в проточной части ступени турбодетандерного агрегата требуется, во-первых, трехмерная модель или чертежи проточной части ступени, а в идеальном случае – поверхность сканирования уже готового и испытанного образца, во-вторых, условия проведения эксперимента и сведения об оборудовании, используемом в экспериментальном стенде, и, в-третьих, результаты непосредственно испытаний. Как правило в открытых источниках нет данных по всем трем пунктам, т.к. подобного рода данные зачастую являются коммерческой тайной организаций, которые проектируют и испытывают оборудование, а также занимаются его реализацией.

В настоящей работе приводится сравнение с экспериментальными данными<sup>3</sup>, которые были предоставлены сторонней организацией. Экспериментальные данные представляют собой результаты статических предварительных испытаний на холостом ходу, т.е. без имитации нагрузки. На рисунке 5 представлена схема экспериментальной установки. Из баллона 1 через клапан 2 рабочее тело (гелий) поступает во входную группу турбодетандерного агрегата (НА), затем, вращая рабочее колесо, расширяется и через диффузор попадает в магистраль через отсечной кран 10. Частота вращения рабочего колеса определяется датчиком 7. Параметры рабочего тела на входе регистрируются датчиками давления и температуры 3, а на выходе – датчиками 8. Регулировка расхода и давления осуществляется клапаном 2.

---

<sup>3</sup> Внутренний отчет организации № К188 ТД





**Рисунок 5.** Принципиальная схема экспериментальной установки для проведения обкаточных испытаний ступени турбодетандерного агрегата. 1 – баллон с гелием; 2 – клапан; 3, 8 – датчики давления и температуры; 4 – входная группа турбодетандерного агрегата; 5 – РК; 6 – Д; 7 – датчик частоты вращения РК; 9 – байпасный кран; 10 – отсечной кран

Для определения статической температуры в трубопроводе установлены 5 термопар  $Cu/Cu:Fe$  в радиальном направлении, которые специально разработаны для измерений в диапазоне от 3 до 300 К и применяются в криогенных системах для научных и промышленных исследований. Для измерения статического давления по такой же схеме располагаются криогенные датчики  $МПДА-ДП$  специального исполнения с диапазоном рабочих температур от 23 до 313 К. По результатам измерений пяти каналов значения температуры и давления усредняются. В таблице 1 представлены исходные параметры, которые задавались в эксперименте и использовались для проведения CFD-расчетов.

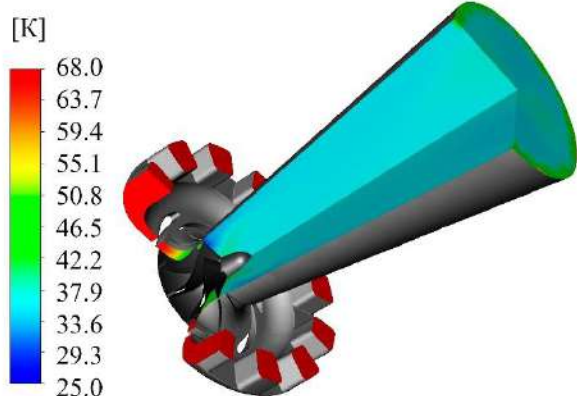
**Таблица 1.** Исходные данные для проведения CFD-расчетов

Номер опыта	$\Omega$ , тыс. мин <sup>-1</sup>	$p_n$ , МПа	$p_k$ , МПа	$T_n$ , К
1	141	1.04	0.19	86.1
2	144	0.94	0.16	90.7
3	146	1.06	0.19	88.7
4	150	1.04	0.21	74.7
5	153	1.04	0.19	85.4
6	157	1.04	0.19	77.1
7	155	0.97	0.19	67.9

В ходе исследования была произведена серия расчетов, результаты которых представлены в таблице ниже. Таблица 2 содержит результаты CFD-расчета и эксперимента для конечной температуры и изоэнтропийного КПД. С учетом соответствующих потерь значение этой температуры есть следствие процессов, происходящих в проточной части ТДА, поэтому данный параметр рассматривается как один из основных и по нему проводится верификация расчетной методики. Распределение температуры в сечении проточной части представлено на рисунке 6.

**Таблица 2.** Результаты эксперимента и CFD-расчета конечной температуры и изоэнтروпийного КПД

Номер опыта	$T_k, K$		$\eta_s, \%$	
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
1	56.1	56.16	70.95	71.02
2	59.3	59.36	68.51	68.58
3	57.6	57.66	70.84	70.91
4	48.3	48.35	73.15	73.22
5	54.8	54.85	72.93	73.00
6	49.4	49.45	73.15	73.22
7	37.4	37.46	75.22	75.07



**Рисунок 6.** Распределение температуры в сечении ступени проточной части турбодетандерного агрегата.

Также было показано влияние учета газа, не совершающего полезную работу (т.н. перетечек) на изоэнтропийный КПД ступени турбодетандерного агрегата. Сделан вывод о целесообразности учета перетечек ввиду их заметного влияния на значение КПД.

Одним из основных результатов главы можно считать сравнение экспериментальных данных и CFD-исследования для конкретной конструкции, которое показывает, что максимальное отклонение изоэнтропийного КПД, а также температуры на выходе из диффузора не превышает 3%. Это свидетельствует о хорошем согласовании результатов расчета и эксперимента, а также о целесообразности применения расчетной методики при создании других вариантов проточных частей микротурбодетандерных агрегатов в области граничных условий и режимов работы, близких к исследованным.

**Пятая глава** посвящена основным задачам всего диссертационного исследования – оценке влияния объемной конденсации на эффективность ступени конкретной конструкции, на элементы проточной части, а также локализации областей возникновения фазовых переходов. В реальных условиях рабочая среда, поступающая в турбодетандер, содержит некоторое количество примесей, которые влияют на характеристики потока, на результирующее значение температуры на выходе из ТДА, а также на срок службы проточной части агрегата. Наличие примесей зачастую становится причиной эрозийного разрушения лопаток рабочего колеса вследствие их бомбардировки каплями образующегося конденсата. В главе показана методика расчета расширения многокомпонентных смесей в

проточной части ступени турбодетандера как без конденсации, так и с учетом этого явления. На основании расчетов проводится сравнительный анализ влияния конденсации на термогазодинамику процесса расширения, а также локализируются области конденсации и оцениваются ее вероятные последствия.

Ввиду сложностей с поиском экспериментальных данных для прямого сравнения принимается следующее допущение: объединение двух проверенных подходов к описанию рассматриваемой проблемы даст адекватный реальности результат. Если проверена модель объемной конденсации, а также проверена (пусть и в узких границах применимости лично автором, но в широких другими авторами) методика решения задачи о расширении газовых потоков в проточной части турбодетандерного агрегата, то объединение этих подходов даст достоверный результат при решении задачи об объемной конденсации при расширении парогазовой смеси в турбодетандере.

Математическое описание процесса мало отличается от представленного в предыдущей главе. Основные отличия заключаются в том, что рассматривается смесевое рабочее тело, ввиду чего добавляется дополнительное уравнение диффузии. Также используется уравнение состояния Редлиха – Квонга для неконденсирующегося компонента, и интерполяционное уравнение состояния для конденсирующегося компонента. При этом плотность смеси определяется из уравнения:

$$\rho_{см}(p, T) = \frac{pM_{см}}{Z_{см}(p, T)RT}, \quad (7)$$

где  $M_{см}$  – молярная масса смеси,  $Z_{см}$  – коэффициент сжимаемости смеси.

Также важным отличием является необходимость определения энтальпии смеси для расчета изоэнтропийного КПД. Итоговая формула для расчета изоэнтропийного КПД при расширении для смесевое рабочего тела выглядит следующим образом:

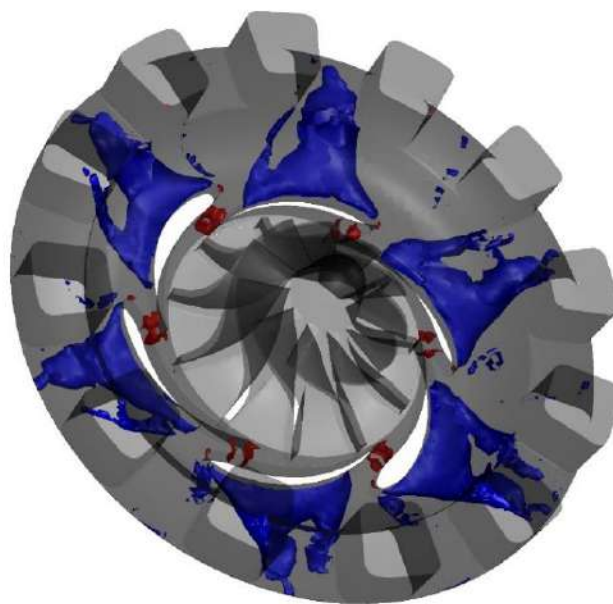
$$\eta_s = \frac{\left[ \sum_{j=1}^{mm} \frac{Z_{см} M_j}{M_{см} Z_j(p_H, T_H)} C_j h_j(p_H, T_H) \right]_{H}^{см} - \left[ \sum_{j=1}^{mm} \frac{Z_{см} M_j}{M_{см} Z_j(p_K, T_K)} C_j h_j(p_K, T_K) \right]_{K}^{см}}{\left[ \sum_{j=1}^{mm} \frac{Z_{см} M_j}{M_{см} Z_j(p_K, T_S)} C_j h_j(p_K, T_S) \right]_{S}^{см}} \quad (8)$$

где  $C_j$  – объемная доля компонента.

Как было отмечено выше, одна из задач исследования – локализация областей возникновения фазовых переходов, а именно объемной конденсации. На рисунке 7 видно, что таких зон в проточной части ступени несколько, и их условно можно разделить на два типа (хотя, конечно, стоит оговориться, что в каждой из этих зон происходит оба процесса, однако их интенсивность отличается на несколько порядков): в одной из зон происходит активное образование капель, но при этом размер капель остается практически неизменным, т.е. фаза активного роста отсутствует, и второй тип – капли, образовавшиеся ранее и образующиеся в процессе, начинают активно расти с присутствующим уровнем тепловыделения.



На следующем шаге при определении влияния объемной конденсации на работу ступени в целом следует оценить негативный вклад данного процесса в эффективность охлаждения рабочего тела. Для упрощения представления материала ниже приводятся обобщенные результаты расчетов проточной части ступени турбодетандерного агрегата для трех случаев: для чистого неконденсирующегося газа, для смесового рабочего тела при отсутствии фазовых переходов и для смесового рабочего тела с учетом объемной конденсации. Эта данные сведены в таблицу 3 для упрощения сравнения и ввиду невозможности наглядного представления их в графическом виде.



**Рисунок 7.** Локализация областей активной конденсации (синий цвет – область образования капель, красный – зона их интенсивного роста).

**Таблица 3.** Результаты CFD-расчета

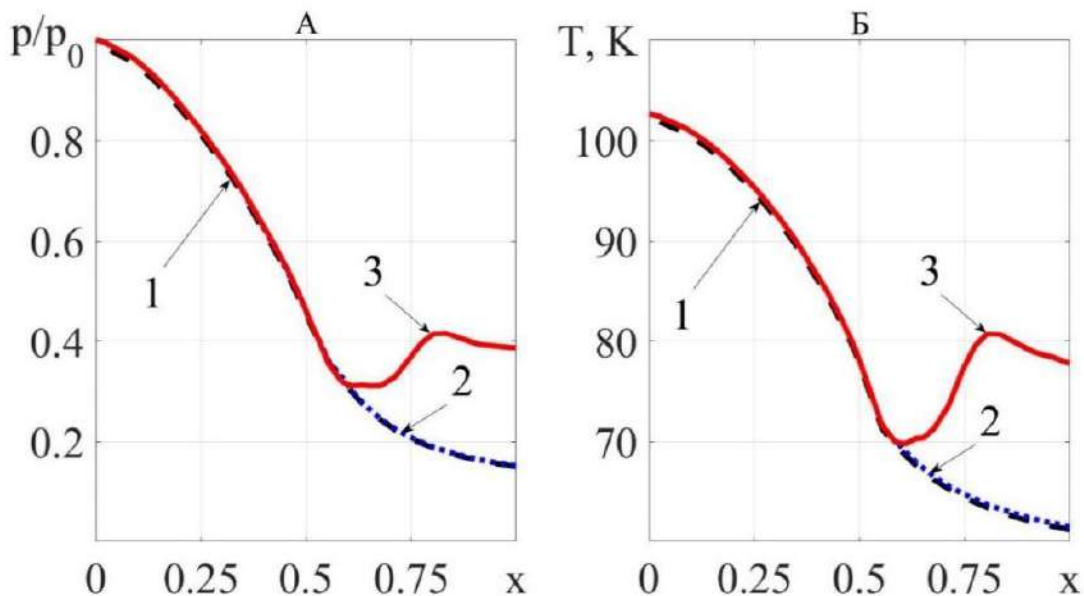
№	Параметр	Размерность	Чистый газ (He)	Смесь (He + 5% N <sub>2</sub> )	
			Без учета конденсации	С учетом конденсации	С учетом конденсации
1	P <sub>n</sub>	атм	18.000	18.000	18.000
2	P <sub>k</sub>		0.764	0.719	0.702
3	T <sub>n</sub>	К	99.98	99.98	99.98
4	T <sub>k</sub>		44.89	45.29	48.73
5	T <sub>h-s</sub>		27.92	27.40	26.53
6	h <sub>n</sub>	кДж/кг	539.64	539.64	539.64
7	h <sub>k</sub>		248.22	250.28	268.16
8	h <sub>s</sub>		379.73	382.38	387.21
9	h		291.50	289.36	271.81
10	G <sub>He</sub>	кг/с	0.2		
11	G <sub>N2</sub>		0	0.01	
12	ω	тыс. об/мин	140		
13	η <sub>s</sub>	%	76.77	75.68	70.20

Из таблицы 3 видно, что наличие примесей без учета фазовых переходов слабо влияет на итоговый изоэнтروпийный КПД вследствие малого количества примесей (в расчете массовая доля паров азота составляет 5%). Однако, если



учитывать возможность возникновения фазовых переходов, а именно объемную конденсацию, то это влияние оказывается весьма существенным: изоэнтропийный КПД ступени снизился примерно на 6.5 процентных пунктов, что объясняется активным тепловыделением при росте капель (теповыделение при образовании капель также имеет место, однако оно на порядки меньше тепловыделения при росте капель, как было показано в главе 3).

На рисунке 8 дополнительно иллюстрируется этот эффект. Так, видно, что в зоне активного роста капель температура и давление вследствие активного тепловыделения увеличиваются, что в итоге влияет на эффективность работы ступени – эффективность охлаждения потока в направляющем аппарате снижается, что приводит к поступлению в рабочее колесо более теплого потока. Вследствие этого ступень турбодетандера менее эффективно выполняет свою основную функцию – генерацию холода.

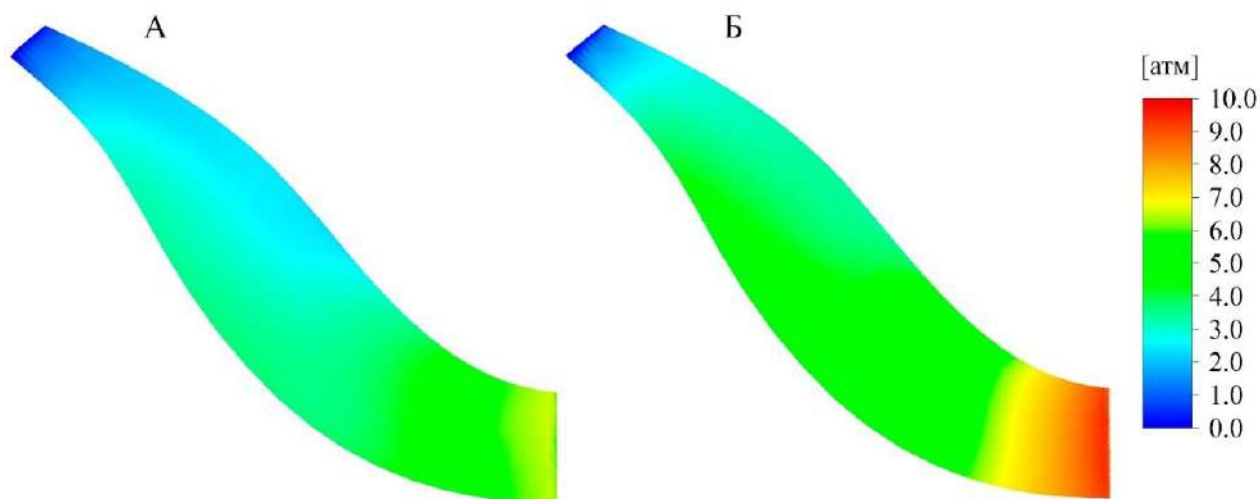


**Рисунок 8.** А – распределение относительного давления, 1 – чистый газ, 2 – смесь, 3 – смесь с учетом конденсации. Б – распределение температуры, 1 – чистый газ, 2 – смесь, 3 – смесь с учетом конденсации

Помимо снижения эффективности процесса детандирования при расширении смесового потока с учетом конденсации, есть как минимум еще одно негативное воздействие. Вследствие образования и роста капель до достаточно большого размера (около 0.6 мкм в диаметре) увеличивается вероятность износа как проточной части в целом, так и лопаток рабочего колеса. При длительном воздействии это может приводить к эрозийному разрушению рабочего колеса, и гарантированно снижает рабочий ресурс проточной части.

Рисунок 9 (А и Б) демонстрирует влияние объемной конденсации на лопатки рабочего колеса: так, видно, что в случае истечения смеси с учетом объемной конденсации (рисунок 9-Б) давление на лопатку в области входной кромки существенно выше, чем в случае с истечением чистого газа без конденсации. Так,

например, в области входа на рисунке 9-А максимальное давление потока составляет  $\sim 6.5$  атм, в то время как во втором случае на рисунке 9-Б это значение составляет  $\sim 10$  атм. Это объясняется тем, что капли конденсата, образовавшиеся в подводящем коллекторе и активно растущие в направляющем аппарате, имеют большую плотность, по сравнению с газом-носителем и очень высокую скорость, на которой этот смесевой поток «врезается» в лопатку. Именно такое длительное (или импульсное высокой частоты) воздействие приводит к разрушению рабочего колеса.



**Рисунок 9.** Распределение статического давления по рабочей поверхности лопатки рабочего колеса. А – расчет для чистого газа без конденсации, Б – расчет для смеси с учетом конденсации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель объемной конденсации, основанная на решении кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в трехмерном нестационарном виде. Модель реализована в виде специального программного модуля, интегрируемого в CFD-пакет, пригодного для использования с различными типами решателей, а также для задач в двумерной и трехмерной постановках.

2. Разработанная модель объемной конденсации проверена и подтверждена на примере решения задачи о сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопла разных профилей для двух наборов экспериментальных данных в двумерной и трехмерной постановках с учетом образования капель и их роста. Сделаны выводы о важности учета не только образования капель, но и их роста.

3. Разработана и проверена на одном наборе экспериментальных данных методика расчета термогазодинамики процесса расширения рабочего тела в ступени проточной части турбодетандерного агрегата в трехмерной постановке методами CFD с учетом утечек и перетечек для конкретной конструкции.

4. Решена задача истечения парогазовой смеси при расширении в ступени проточной части турбодетандерного агрегата с учетом процесса объёмной



конденсации в трехмерной постановке. Сделаны выводы о влиянии объемной конденсации на эффективность конкретной конструкции проточной части в целом; показано, как воздействует газожидкостный поток на лопадки рабочего колеса, получено качественное согласование с примерами реальных разрушений вследствие эрозийного износа. Локализованы области возникновения фазового перехода.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Влияние геометрических характеристик канала и свойств парогазовой смеси на объемную конденсацию при течении в сопле // Теплоэнергетика, 2018, № 1, С. 68 – 76. DOI: 10.1134/S004036361801006X

2. **А.А. Sidorov, А.К. Yastrebov.** CFD-calculation of influence of impurities on the characteristics of a helium turboexpander // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 022052 DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022052

3. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Интеграция модуля численного решения кинетического уравнения в CFD-пакет для задачи объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 65-75. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75.

4. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Численное моделирование процесса детандирования в турбоагрегате расширительного типа методом конечных объемов // Теплоэнергетика, 2021, №8, С. 17-25. DOI: 10.1134/S0040363621070043.

5. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Влияние зависимости свойств от температуры на объемную конденсацию в парогазовом потоке // Сборник докладов. XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, 2017, Т1, С 374.

6. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Численное моделирование объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло методом конечных объемов. Доклад. Труды РНКТ-7, М.: Издательский дом МЭИ, 2018, Т1, С 73-75.

7. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Влияние зависимости свойств от температуры на объемную конденсацию в парогазовом потоке // Сборник тезисов докладов. XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, 2017 г., Т1, С 267.

8. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Влияние геометрических характеристик и свойств парогазовой смеси на объемную конденсацию при течении в сопле // Материалы международной конференции Современные Проблемы Теплофизики и Энергетики, 2017 г., Т1, С 281-283.

9. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** CFD-исследование объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло //Тезисы докладов, РАДИО-ЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 2018 г. С 814.

10. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** CFD-исследование объемной конденсации в диффузоре турбодетандерного агрегата //Тезисы докладов, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 12-13 марта 2020 г., С 840.

11. **И.О. Вавилов, А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** CFD-исследование турбодетандерного агрегата //Тезисы докладов, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 12-13 марта 2020 г., С 841.

12. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** CFD-расчет влияния примесей на характеристики гелиевого турбодетандера // Современные проблемы теплофизики и энергетики (19–23 октября 2020): материалы III международной конференции. – М.: Издательство МЭИ, 2020. – с. 272-273.

13. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Интеграция модуля решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в CFD-пакет //Тезисы докладов, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 11-12 марта 2021 г., С 843.

14. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Локализация областей возможных фазовых переходов в ступени проточной части турбодетандерного агрегата методами CFD //Тезисы докладов, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 11-12 марта 2021 г., С 844.

15. **А.А. Сидоров, А.К. Ястребов.** Численное исследование объемной конденсации в проточной части ступени турбодетандерного агрегата // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (24-28 мая 2021 г., г. Екатеринбург). – М.: Издательский дом МЭИ, 2021. – с.168-169.