

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ИПМех  
им. А.Ю. Ишлинского РАН  
Д.Т.Н.



В.И.Карев

2021 года

04.12.2021 № 11004/01-2141.2-625

На № \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» на диссертацию Назарова Владислава Сергеевича «Численное моделирование процессов фазового перехода в технологических установках», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Назарова Владислава Сергеевича посвящена созданию и усовершенствованию математических моделей в области конденсации и испарения в газодинамических течениях, разработке численных методов, направленных на решение прикладных задач с учетом фазовых переходов.

#### Актуальность темы

Фазовые переходы, в частности, конденсация и испарение, играют важную роль в современной технике и производстве. Они важны в таких интенсивно развиваемых в настоящее время приложениях, как технология вакуумного напыления покрытий, разделение природного газа, обработка поверхностей пучками кластерных ионов и многих других. Поэтому проблема адекватного моделирования газодинамических течений с фазовыми переходами очень актуальна с теоретической и практической точек зрения. Для решения этой проблемы требуется доработка физико-математической модели таких течений и разработка численных методов и алгоритмов для проведения численного моделирования течений с конденсацией и испарением.

для документационного  
обеспечения МАИ

08.12.2021г.

## Краткий анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения; пяти глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 150 страниц, включая 10 таблиц и 103 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 123 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы. Освещается обзор литературы

В **первой главе** рассматриваются подходы к моделированию гомогенной конденсации. Описывается численный метод моделирования течений газовой среды с конденсацией и испарением.

В рамках используемого в работе метода моментов процесс конденсации рассматривается как совокупность двух этапов. Первый этап – нуклеация, а на втором этапе происходит рост образовавшихся капель за счет конденсационного осаждения паров на их поверхности. В традиционной модели метода моментов вводятся четыре дополнительных уравнения для моментов. Автором введено дополнительное уравнение для эволюции массовой доли конденсирующейся фракции (то есть суммы долей жидкой фракции и фракции пара). Такой подход позволил расширить класс решаемых задач и учесть неоднородность массовой доли конденсирующейся фракции, которая может возникнуть во множестве прикладных приложений. Например, при помощи предложенного варианта метода моментов можно проводить численное моделирование течений с неоднородным содержанием конденсирующегося вещества в разных зонах расчетной области.

Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования течений с гомогенной конденсацией и испарением. Проведено исследование потока инертного газа аргона в системе сопло-струя-скиммер. Разработана модель испарения капли. Проведены расчетные исследования конденсации и испарения в течениях воды, аргона и ксенона. Для валидации математической модели выполнено сравнение результатов численных расчетов течения в плоском сопле с гомогенной конденсацией паров воды в азоте. Получено хорошее соответствие расчетных результатов автора с экспериментальными данными и с результатами решения данной задачи методом на основе кинетического подхода. Численные результаты отличаются друг от друга не больше чем на 2-5%.

В разделе 2.2.3 представлены результаты численного моделирования конденсации в соплах аэродинамических труб, в разделе 2.2.4 – результаты моделирования конденсации перегретого водяного пара в микросоплах, а в разделе 2.2.5 – результаты исследования конденсации ксенона в микросоплах.

В **третьей главе** рассматривается подход для моделирования гетерогенной конденсации и испарения. В модели ведется учет наличия чужеродных примесей и их влияние на образование зародышей капель.

Система моментных уравнений для моделирования гетерогенной конденсации также расширена уравнением распространения массовой доли конденсирующейся фазы. Автором приводится форма функции деактивации кластеров при испарении, что позволяет учесть сохранение первоначальной функции распределения твердых частиц по размерам.

Вычислительный алгоритм расчета гетерогенной конденсации и испарения в газодинамических потоках тестировался на экспериментальных данных, полученных на ударной трубе в работе Smolders et al, 1992. В данном эксперименте исследовалось конденсация и испарение паров воды на нанометровых частицах. Рассчитанные параметры течения (давление, температура, уровень перенасыщения и средний радиус капель) на разных временных слоях в определенной "экспериментальной точке" внутри трубы показали удовлетворительное совпадение с экспериментом.

В **четвертой главе** предложена модель гомогенно-гетерогенной конденсации. При построении этой модели автором предполагалось, что гомогенные и гетерогенные переходы могут происходить параллельно. В результате этого предположения автором получена расширенная моментная модель, содержащая десять дополнительных уравнений. На основе предложенной модели изучено возможное влияние конденсации гомогенного типа на трактовку экспериментальных результатов по гетерогенной конденсации, приведенных в главе 3. Исследовано совместное протекание гомогенной и гетерогенной конденсации в ударной трубе.

Во второй части главы представлена серия численных экспериментов в ударной трубе, которая позволила изучить взаимное влияние двух различных типов конденсаций на изменение газодинамических параметров.

В **пятой главе** предложен и численно исследован новый подход к очистке газа от чужеродных частиц с использованием эффектов конденсации и эжекции. Разработана математическая модель эжекторного устройства подобного типа. Дана оценка эффективности работы устройства в зависимости от количества примесей, содержащихся в газе. Предложена методика расчета характеристик эжектора с учетом процессов конденсации.

Основное внимание в пятой главе диссертации автор уделит оценке потенциальной возможности увеличения капель, возникающих на инородных частицах, до размеров, необходимых для их сепарации с использованием центробежной силы. На основе проведенного численного моделирования в данной главе предложены рекомендации по улучшению работы эжекторного устройства очистки.

В **заключении** формулируются основные результаты диссертации в соответствии с поставленными в диссертации задачами, обладающие научной и технической новизной и выносимые на защиту.

Работа в области исследований соответствует специальности 01.02.05 "Механика жидкости газа и плазмы по пунктам":

- п.3 Ламинарные и турбулентные течения;

- п.4 Течения сжимаемых сред и ударные волны;
- п.6 Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии);
- п.8 Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.);
- п.15 Тепломассоперенос в газах и жидкостях;
- п.18 Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

### **Оценка новизны и практической значимости**

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

Автор предложил расширить систему моментных уравнений для описания конденсации за счет дополнительного уравнения для переноса массовой доли конденсирующейся фазы, что позволило учесть неоднородность среды. Это дополнение позволило решить ряд прикладных задач, рассмотренных автором в работе, в которых существенна неоднородность среды.

Установлены значения коэффициентов конденсации и нуклеации в модели конденсации на основе экспериментов и полуэмпирической теории Хагены.

Предложена модель фазового перехода в среде, в которой возможно одновременное протекание процессов гомогенной и гетерогенной конденсации и испарения.

Предложен и запатентован новый способ осуществления очистки газов от мелкой сажи. Численное моделирование позволило выдвинуть ряд рекомендаций по улучшению системы очистки.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке программного комплекса, позволяющего рассчитывать газодинамические течения с фазовыми переходами, для решения нового широкого класса задач, в которых в разных областях расчетной области может происходить гомогенная и гетерогенная конденсации и испарение.

**Достоверность** результатов диссертации проверена при помощи проведения тестирования путем сопоставления с результатами ряда экспериментальных работ по гомогенной и гетерогенной конденсаций, сравнения с численными результатами других авторов и результатами полуэмпирических теорий. Разница результатов, полученных при численном моделировании, от измеренных в экспериментах, не превышает 3 % - 5 %.

**Публикации, апробация результатов работы и личное участие автора в получении результатов диссертации.**

По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 16 работ, том числе 8 статей в периодических изданиях, включенных в

перечень ВАК и/или из МСЦ; 7 публикаций в тезисах докладов Международных и Всероссийских конференций; получено одно свидетельство о государственной регистрации патента. Личный вклад автора в статьях и свидетельстве о государственной регистрации патента составляет более 50%. Автором разработаны алгоритмы для решения предложенных системы уравнений, написаны программы расчета течений с конденсацией, описанные в диссертации, и проведены расчеты для различных технологических установок.

Диссертационное исследование было поддержано в рамках фундаментальных исследований грантом РФФИ №19-31-90130, а также в рамках государственного задания № FSFF-2020-0013.

Результаты диссертационной работы предлагается использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах в авиационно-космической промышленности.

### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В диссертационной работе автор начинает представление разработанного программного комплекса для численного моделирования гомогенно-гетерогенной конденсации с валидации на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Более корректно было бы начать с верификации программного комплекса, сравнивая результаты расчетов с решения упрощенных или модельных задач.
2. В пятой главе диссертации для моделирования турбулентности используется модель Смагоринского. Хорошо известно, что эта модель не позволяет корректно воспроизвести характеристики турбулентности в пристеночном слое. В рассмотренном в пятой главе устройстве гетерогенная конденсация происходит вдали от стенки. Поэтому использование модели Смагоринского не должно сказаться на основных результатах, полученных автором в этой главе. Но в дальнейшем автору следует перейти к другим моделям турбулентности, позволяющим правильно рассчитывать пристеночные слои.
3. В предложенных автором моделях гомогенной и гетерогенной конденсации, которые используются в пятой главе для расчета турбулентных течений, не учитывается влияние турбулентности потока на скорость роста кластеров и нуклеацию.
4. Описанный во второй главе численный эксперимент по исследованию истечения аргона из микросопла в вакуумную камеру и скиммер показал, что капли, образовавшиеся в сопле и струе, испаряются практически полностью при прохождении смеси через ударную волну перед скиммером. То есть при данном режиме течения не могут возникнуть кластерные пучки. С практической точки зрения

было бы интересно выделить режимы течения, при которых в данном устройстве существовал бы устойчивый поток кластеров на выходе.

### Заключение

Сделанные замечания не снижают актуальность и значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация Назарова В.С. является законченной научно-квалификационной работой, посвящена актуальной теме, выполнена автором на высоком научном уровне и обладает как научной новизной, так и практической значимостью. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

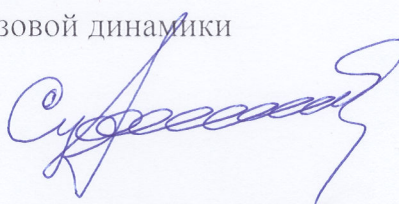
Диссертационная работа содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки, графики, примеры, подробные расчеты, написана технически квалифицированно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы.

Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате, соответствующем содержанию диссертации.

Диссертация Назарова В.С. на тему «Численное моделирование процессов фазового перехода в технологических установках» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а её автор Назаров Владислав Сергеевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Проект отзыва заслушан на семинаре Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН.

Зав. Лаборатории радиационной газовой динамики  
ИПМех РАН  
профессор, академик РАН



С.Т.Суржиков

Контактная информация:

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Сайт: [ipmnet.ru](http://ipmnet.ru)

Телефон: +7-495-434-00-17

e-mail: [ipm@ipmnet.ru](mailto:ipm@ipmnet.ru)