

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию Назарова Владислава Сергеевича
«Численное моделирование процессов фазового перехода в
технологических установках»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Актуальность темы диссертации

Процессы объемной конденсации встречаются во многих отраслях техники, при этом в различных случаях они могут играть как отрицательную, так и положительную роль. С одной стороны, в турбомашинах существенной проблемой является износ проточной части вследствие эрозии, вызванной бомбардировкой рабочих поверхностей образовавшимися в объеме каплями; в авиации объемная конденсация может приводить к появлению областей повышенного давления и температуры (скачков конденсации), которые могут существенно влиять на характеристики летательных аппаратов. С другой стороны, процессы объемной конденсации используются для частичного ожижения газов в расширительных устройствах дроссельного типа в установках холодильной и криогенной техники.

Достаточно распространенным подходом в современной инженерной практике является учет объемной конденсации с помощью различных эмпирических соотношений, имеющих ограниченную область применимости. Однако развитие методов вычислительной гидродинамики позволяет заменить такой подход численным моделированием объемной конденсации в том числе и для нестационарных процессов, для сложной геометрии систем, требующих решения задач в трехмерной постановке и т.п. В связи с этим разработка новых подходов к такому моделированию и их верификация путем сравнения с экспериментальными данными является актуальной задачей. Применение метода моментов для расчетного анализа процессов объемной конденсации представляется наиболее предпочтительным для систем сложной геометрии, так как использование других методов (например, прямого численного решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам) может привести к существенному росту требуемых вычислительных ресурсов и затрат времени. Таким образом, тема диссертации В.С. Назарова, в которой рассматривается численное моделирование процессов гомогенной и гетерогенной объемной конденсации в различных устройствах с помощью метода моментов, является актуальной.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении представлен обзор современного состояния исследований процессов

объемной конденсации, на основе которого обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию подхода к численному моделированию процессов объемной конденсации на базе метода моментов. На базе принятых допущений сформулирована система уравнений, описывающих процесс объемной конденсации в смеси пара и неконденсирующегося газа. Данная система включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии, уравнения для моментов функции распределения капель по размерам, а также уравнение для массовой доли конденсирующегося компонента (т.е. уравнение сохранения массы компонента смеси). Также представлены используемые в дальнейшем выражения для скорости нуклеации и скорости роста капель. Глава завершается описанием численного метода решения системы моментных уравнений.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с верификацией используемого подхода с помощью сравнения с данными других авторов. Наибольший интерес представляет раздел 2.2.2, в котором представлено сравнение с экспериментальными данными других авторов для результатов расчетов при различных вариантах постановки задачи: одномерная постановка, двумерная постановка для невязкой и нетеплопроводной среды, двумерная постановка с учетом вязкости и теплопроводности. Такой подход позволяет не только верифицировать используемую модель описания объемной конденсации и метод численного решения системы уравнений, но и оценить влияние эффектов, связанных с неоднородностью течения, а также вязкостью и теплопроводностью среды.

В третьей главе используемый подход к моделированию объемной конденсации распространяется на задачи, в которых в парогазовом потоке присутствуют центры гетерогенной конденсации, поверхность которых в первом приближении считается идеально смачиваемой. Для гетерогенной конденсации температура капель не принимается равной температуре газовой фазы, а вычисляется с использованием квазистационарного приближения (тепло, выделившееся при конденсации, полностью отводится в газовую фазу). Хотя такой подход к расчету температуры капель и скорости роста требует дополнительного обоснования, его использование позволяет обойтись без дополнительного уравнения энергии для центров гетерогенной конденсации и образовавшейся на них жидкости. В рассматриваемом случае температура капли может достигнуть такого значения, при котором меняется знак скорости роста, т.е. конденсация сменяется испарением образовавшейся ранее жидкости. В математической модели для испарения капель используется своя система моментных уравнений, особенностью которой является отсутствие аналога скорости нуклеации в уравнениях для всех моментов, кроме нулевого. Также в данной главе представлено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными других авторов.

В четвертой главе представлена обобщенная модель гомогенной и гетерогенной конденсации, происходящих в одной системе в одно и то же время. При этом считается, что эти процессы происходят независимо друг от друга, в связи с чем в модели используются две системы моментных уравнений. Также в главе приводятся результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными (рассматривается тот же эксперимент, что и в третьей главе), которые показали преобладание гетерогенной конденсации в условиях эксперимента. В завершающей части главы приводятся результаты расчетов для конденсации в ударной трубе при различных исходных данных, в расчетах варьировались размер центров конденсации и их количество в единице массы смеси. Показано, что в зависимости от количества центров гетерогенной конденсации меняется соотношение между гомогенным и гетерогенным механизмом, результаты расчетов указывают на принципиальную возможность управления процессом гомогенной конденсации путем введения в поток гетерогенных центров конденсации заданной концентрации и размера.

В пятой главе рассматривается подход к очистке газа от примесей мелкодисперсных частиц (например, продуктов сгорания), основанный на том, что размер частиц за счет конденсации пара на их поверхности можно увеличить до таких величин, которые позволяют отделить частицы от газовой фазы. Результаты расчетов показали, что размер частиц не становится достаточным для очистки потока в устройствах циклонного типа, однако для них могут быть использованы другие способы сепарации.

Научная новизна

В работе представлены доработанные модели гомогенной и гетерогенной конденсации, основанные на применении метода моментов для описания кинетики объемной конденсации. Особенностью моделей является использование дополнительного уравнения для переноса массы конденсирующегося компонента смеси пара, неконденсирующегося газа и жидкости. Выполнена верификация моделей с помощью сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными других авторов, с использованием моделей получен ряд новых расчетных данных для гомогенной и гетерогенной конденсации в различных задачах. Предложен новый способ очистки газов от мелкодисперсных примесей за счет увеличения размеров частиц примесей вследствие гетерогенной конденсации.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточно хорошим согласованием с экспериментальными данными других авторов для различных задач, а также подробным описанием постановки задачи, проведения расчета и анализа полученных результатов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены теоретическими выкладками и полученными в работе результатами расчетов.

Практическая значимость работы

С точки зрения практического применения наиболее важной частью работы является пятая глава, в которой предлагается использовать конденсационный рост частиц для того, чтобы увеличить их размер до величины, достаточной для очистки газа от них различными способами. Устройства для очистки газов от мелкодисперсных частиц, основанные на применении такого подхода, могут быть использованы, в частности, для очистки дымовых газов от частиц сажи. В целом используемый подход к численному моделированию объемной конденсации может использоваться для расчетного анализа данного процесса в различных технических устройствах, например, в расширительных устройствах дроссельного типа, используемых в ожижительных и рефрижераторных установках холодильной и криогенной техники (в частности, в установках для сжижения природного газа), в турбодетандерах, предназначенных как для воздуходелительных установок низкого давления, так и для снижения давления перед конечными потребителями в современных системах газораспределения.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на положительную оценку работы в целом, по ней имеются следующие замечания:

- 1) При описании моделей для скорости роста капли (разделы 1.1.2 – 1.1.4) не указаны пределы применимости различных моделей. Формула Герца – Кнудсена некорректно названа формулой Герца – Кнута, для коэффициента конденсации β в этой формуле используется не вполне понятное название «множитель, корректирующий скорость роста капли».
- 2) В уравнениях Навье – Стокса (1.1) – (1.4) учитывается молекулярный перенос импульса и энергии (т.е. вязкие напряжения и тепловой поток, передаваемый за счет теплопроводности). В связи с этим непонятно, почему в уравнении для массовой доли конденсирующейся фракции (1.14) не учитывается перенос массы этой фракции за счет диффузии.
- 3) В разделе 2.2.2 выбрана не вполне удачная форма сравнения расчетных и экспериментальных данных: результаты расчетов с использованием различных методов сравниваются с экспериментальными данными по отдельности, прямое сравнение различных расчетных методов между собой отсутствует.
- 4) Подход, используемый для расчета скорости роста при анализе гетерогенной конденсации, фактически основан на тепловом балансе в квазистационарном приближении: уравнение (3.19) предполагает, что выделившееся при конденсации тепло полностью отводится в парогазовую среду. Возможность применения такого подхода требует дополнительного обоснования.

