

На правах рукописи



Назаров Владислав Сергеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва, 2021 г.

Работа выполнена на кафедре 806 «Вычислительная математика и программирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: **Иванов Игорь Эдуардович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Молекулярные процессы и экстремальные состояния вещества» Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова или МГУ).

Официальные оппоненты: **Быков Николай Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Центра перспективных исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Ястребов Арсений Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур Национального исследовательского университета «МЭИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

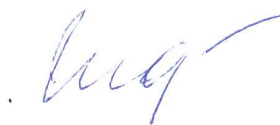
Защита состоится «24» декабря 2021 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.14 Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4, или на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=161023

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4, отдел ученого и диссертационных советов.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, д.ф.-м.н., доцент



В.Ю. Гидаспов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Процесс конденсации сопровождает многие явления в природе и современных технических приложениях. Конденсат может образовываться в областях разрежения на аэродинамических поверхностях, на лопастях турбореактивных двигателей, при резком расширении газа в ракетных соплах и т.д. Образование конденсата, может приводить к образованию областей повышения давления (скачков конденсации), что сказывается на аэродинамике летательных аппаратов (ЛА), параметрах двигательных и технологических установок. Иногда в частях ЛА, где образуется веер волн разрежения (ВВР) могут появляться наледи.

Однако конденсация играет не только негативную роль. Без конденсации не существовало бы ряда полезных приложений: обработка поверхностей пучками кластерных ионов, технология вакуумного напыления покрытий, разделение природного газа и других, - исследование и развитие которых активно ведется в последние годы.

Цель и задачи диссертации. Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы построить математическую модель вязкого течения многокомпонентной сжимаемой среды с учетом возможности осуществления фазового перехода в ней и расширить область возможных прикладных приложений конденсации в технологических установках. Расширить область применимости ММ в части моделирования гомогенно-гетерогенной конденсации. Разработать вычислительный алгоритм для численного решения системы уравнений данной математической модели. Разработать программный комплекс для проведения численных экспериментов и с помощью этого комплекса провести численные исследования течений газовых смесей и чистых газов с фазовыми переходами (гомогенная гетерогенная конденсация и испарение) в ударных трубах, соплах, эжекторах и струях. Провести верификацию предложенных моделей и валидацию вычислительного алгоритма. Разработать предложения по решению проблемы очистки газа на теплоэлектростанциях от мелкодисперсных частиц, размер которых не превышает 1мкм.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Построение математической модели процессов фазовых переходов (гомогенной, гетерогенной и гомогенно-гетерогенной конденсации и испарения) в термодинамическом приближении при течении многофазной многокомпонентной смеси в каналах и струях, основываясь на ММ.
- Построение математического метода решения разработанной математической модели на основе метода конечного объема (метода Годунова повышенного порядка точности);
- Реализация вычислительного алгоритма в виде комплекса программ, позволяющего проводить численные эксперименты по расчету вязких течений с фазовыми переходами в многомерных каналах сложной геометрической формы и струях.
- Верификация и валидация математических моделей и алгоритмов на натуральных экспериментах и классических тестовых задачах.

- Предложение способа осуществления очистки газа от смога, на базе вычислительного эксперимента.

Данная диссертация состоит из пяти глав и направлена на решение вышеуказанных задач.

Научная новизна и практическая значимость работы

- Доработана модель гомогенной конденсации в рамках ММ. Возможности доработанной модели существенно расширены за счет использования дополнительного уравнения для переноса массовой доли конденсирующейся фазы (т.е. суммы массовых долей жидкой и газообразной фракции конденсирующегося вещества). Установлены значения коэффициентов аккомодации и нуклеации для конденсации воды на основе экспериментов и полуэмперической теории Хагены.
- Доработаны математическая модель и метод численного моделирования гетерогенной конденсации. В математическую модель введено новое уравнение, устанавливающее связь между количеством образовавшихся гетерогенных кластеров и количеством кластеров в смеси.
- Предложен новый подход, позволяющий вести учет наличия гомогенно-гетерогенного перехода при образовании кластеров в случае недостаточного количества активируемых частиц.
- В рамках диссертации предлагается один из новых способов использования конденсации. Предложен принцип осуществления очистки газов от мелкодисперсных примесей. В конструкции предлагается использовать чужеродные частицы в качестве ядер конденсации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели и алгоритмы расчета гомогенной конденсации и испарения в газодинамических потоках в рамках Метода Моментов с учетом неоднородности массовой доли конденсирующегося вещества
2. Математическая модель и алгоритм расчета гетерогенной конденсации на мелкодисперсных примесях в газе на основе ММ с учетом неоднородности массовой доли конденсирующегося вещества и неоднородности концентрации твердых, чужеродных примесей в газе
3. Математическая модель и алгоритм расчета гомогенно-гетерогенной конденсации в рамках ММ с учетом неоднородности массовой доли конденсирующегося вещества и неоднородности концентрации твердых, чужеродных примесей в газе
4. Полезная модель осуществления очистки газа от мелкодисперсных примесей.
5. Результаты численного моделирования течений газовых смесей и чистых газов с фазовыми переходами (гомогенная гетерогенная конденсация и испарение) в ударных трубах, соплах, эжекторах и струях

Достоверность полученных результатов проведенных исследований обуславливается непротиворечивостью построенных физических и математических моделей известным

фундаментальным законам сохранения и методам их решения. Результаты математического моделирования и численных расчетов, полученные с помощью разработанных алгоритмов, сравнивались с экспериментально полученными данными и с расчетными результатами других авторов полученных с помощью разных подходов, в том числе и с помощью кинетического подхода. Отличие значений газодинамических параметров и параметров конденсации и испарения (величина насыщения, средний размер капли, массовая доля жидкой фазы), полученных при численном моделировании, от значений, измеренных в экспериментах, не превышает 3 % - 5 %.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается корректностью поставленных задач, применением сертифицированных продуктов, корректным использованием математического аппарата и успешной верификацией математической модели.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях:

Двадцать вторая Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2021), XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта, 2020), 13-ая ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (Москва, 2019), XXI Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2019), XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург 2018), Юбилейная Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2017)

Публикации. По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 16 работ, том числе 8 статьи 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.

Вклад автора заключается в разработке алгоритмов и написании программного комплекса для решения модельных уравнений, проведении расчетов для различных технологических установок.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из введения; трех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 150 страниц, включая 10 таблиц, 103 рисунка и схем. Список использованной литературы содержит 123 наименования.

Благодарности: Автор выражает благодарность научному руководителю Иванову Игорю Эдуардовичу за постановку задач, за помощь при анализе результатов, полезные обсуждения и ценные рекомендации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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. Приводится сравнение результатов численных экспериментов с натурными работами. Освещается численный метод моделирования.

В разделе 1.1 излагаются физическая и математическая модели процесса гомогенной конденсации в газодинамических течениях.

В рамках используемого в работе Метода Моментов (ММ) процесс конденсации рассматривается как совокупность двух этапов. Первый - нуклеация, то есть спонтанное образование кластеров (зародышей) капель. На втором этапе предполагается рост этих капель за счет конденсационного осаждения вещества на их поверхности.

Рост или уменьшение концентрации жидкой фракции влияет на изменение внутренней энергии в потоке за счет выделения (поглощения) скрытой теплоты конденсации. В свою очередь, изменение (повышение) внутренней энергии потока приводит к изменению (повышению) давления и влияет на образование скачков уплотнения, изменение показателя адиабаты и полное изменение структуры потока. Учет этих явлений возможен благодаря определению скорости изменения концентрации жидкой фракции в системе моментных уравнений.

Интенсивность процесса конденсации характеризуется параметром насыщения $S = p_v / p_s$, который выражается как отношение давления паров конденсирующегося вещества к давлению насыщения при данной температуре. При $S > 1$ происходит образование и рост зародышей, пока система не достигнет химического и термодинамического равновесия с окружающей средой.

Предполагается, что среда представляет собой многокомпонентный газ (несущий газ и пары конденсирующегося вещества) и кластеры (капли) конденсирующегося вещества. Каждая компонента газовой смеси является совершенным газом. В смеси газов и капель объемная доля жидкой фазы пренебрежимо мала, между каплями отсутствуют взаимные столкновения, и это значит, что жидко-капельная фаза не имеет собственного давления. Между газовой и жидкой фазой существует механическое и термическое равновесие.

В качестве математической модели динамики такой многокомпонентной двухфазной смеси взята система уравнений Навье-Стокса, записанная в слабо дивергентной форме в осесимметричной постановке, которая дополнена системой моментных уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\rho v}{y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p - \tau_{yy})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{xy})}{\partial y} = -\frac{1}{y}(\rho v^2 - \tau_{yy}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p - \tau_{xx})}{\partial y} = -\frac{1}{y}(\rho uv - \tau_{xx}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(u(\rho E + p) - (v\tau_{yy} + u\tau_{yx} - q_x))}{\partial x} + \frac{\partial(v(\rho E + p) - (v\tau_{yx} + u\tau_{xx} - q_y))}{\partial y} = -\frac{v(\rho E + p)}{y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho Q_0)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q_0)}{\partial y} = J - \frac{\rho Q_0 v}{y}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho Q_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q_1)}{\partial y} = r_* J + \dot{r} \rho Q_0 - \frac{\rho Q_1 v}{y}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho Q_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q_2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q_2)}{\partial y} = r_*^2 J + 2\dot{r} \rho Q_1 - \frac{\rho Q_2 v}{y}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \alpha)}{\partial y} = \frac{4}{3} \pi \rho_l (r_*^3 J + 3\dot{r} \rho Q_2) - \frac{\rho Q_3 v}{y}, \quad (8)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{y} u - \frac{\partial v}{\partial x} \right], \quad \tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left[-\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{y} u + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \right], \quad (9) \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right], \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}. \quad (11) \quad (12) \quad (13)$$

Здесь ρ – плотность, p – давление, T – температура статическая, u – скорость вдоль направления x , v – скорость вдоль направления y , E – полная энергия в единице объема, μ – коэффициент вязкости, λ – коэффициент теплопроводности, Q_0, Q_1, Q_2 – моменты функции распределения, α – массовая доля сконденсировавшейся воды, J – скорость нуклеации, r_* – критический радиус, \dot{r} – скорость роста капли.

Физическая модель среды представляет собой смесь трех фракций (компонент): несущего газа, паров конденсирующегося вещества и капель конденсирующегося вещества. Количественно каждая фракция характеризуется своей массовой долей. Для правильного представления законов сохранения в многофазной среде необходимо в математической модели использовать три уравнения описывающих эволюцию во времени и пространстве массовых долей трех фракций. В настоящей работе используется уравнение неразрывности (1) (для плотности смеси), уравнение для эволюции массовой доли жидкой фазы α_{\max} (8) и уравнение для эволюции массовой доли конденсирующейся фракции α_{\max} (то есть суммы долей жидкой фракции и фракции пара $\alpha_{\max} = \alpha + \alpha_{\text{пар}}$, где $\alpha_{\text{пар}}$ – массовая доля паров конденсирующегося вещества). Такой подход приводит к появлению в системе нового уравнения, которое приводится ниже

$$\frac{\partial(\rho \alpha_{\max})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha_{\max})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \alpha_{\max})}{\partial y} = -\frac{\rho \alpha_{\max} v}{y}. \quad (14)$$

Таким образом для корректного описания динамики неоднородности многофазной среды, введено уравнение распространения массовой доли конденсирующейся фазы (14). Добавление этого уравнения к системе (1) – (13) позволяет расширить класс решаемых задач для течений с гомогенной конденсацией. Например, это позволяет рассмотреть задачи, в которых в начальном распределении параметров в разных зонах в расчетной области задано разное содержание конденсируемого вещества α_{\max} или рассчитывать течения в каналах с изменяющимся во времени значением α_{\max} во входном потоке.

Правые части уравнений (5) - (8) системы рассчитываются с использованием Классической Теории Нуклеации (КТН) с некоторыми модификациями. В работе рассматривается функция скорости нуклеации, зависящая от корректирующих множителей, учитывающих кривизну капли, стационарность процесса и добавлена корректировка для момента начала нуклеации:

$$J = \frac{q_c}{(1+\eta)} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \frac{\rho_v^2}{\rho_l} \exp\left(-g \frac{4\pi}{3} \frac{r_*^2 \sigma}{R_v m T}\right), \quad (15)$$

где $1/(1+\eta)$ - корректирующий множитель учета нестационарности процесса, $\eta = 2 \frac{\gamma_f - 1}{\gamma_f + 1} \frac{L}{R_v T} \left(\frac{L}{R_v T} - \frac{1}{2}\right)$, q_c - коэффициент конденсации ($q_c \approx 1$); $\sigma = k_\sigma \sigma_\infty$, σ_∞ - поверхностное натяжение плоской пленки; k_f - корректирующий множитель, учитывающий кривизну капли; g - множитель, корректирующий начало нуклеации; $S = p_v/p_s$ - параметр перенасыщения.

Для определения величины скорости роста гомогенной капли \dot{r} в работе использовалась модель Герца-Кнута:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\beta}{\rho_l} \frac{p_v - p_{s,r}}{\sqrt{2\pi R_v T}} \quad (16)$$

$p_{s,r} = p_s \exp\left(\frac{2\sigma}{\rho_l R_v T r_{Hill}}\right)$ - давление насыщения на поверхности капли среднего по размерам радиуса.

Критический радиус r_* находится из условия максимума термодинамического барьера:

$$r_* = \frac{2\sigma}{RT \rho_l \ln S} \quad (17)$$

В разделе 1.2 описан численный метод для решения системы уравнений (1)-(14). Члены в уравнениях, описывающие конвективный перенос, аппроксимируются с помощью схемы Годунова С.К. повышенного порядка точности, при этом распределение параметров в расчетных ячейках принимается линейной функцией пространственных координат, коэффициенты этой функции ограничиваются так, чтобы схема сохраняла монотонность. Потоки через боковые грани расчетных ячеек рассчитываются с помощью решения задачи о распаде произвольного разрыва (задачи Римана) приближенным методом (HLL или

AUSM+). Члены, описывающие вязкий (диффузионный перенос) аппроксимируются с помощью схемы контрольного объема, которая на равномерной декартовой сетке сводится к центрально разностной аппроксимации вторых производных по пространственным координатам. Источниковые члены аппроксимируются явным образом. Для продвижения расчета по временной координате применяется метод Эйлера. Алгоритм реализован для двумерных областей сложной геометрической формы. Расчетная сетка регулярная двухмерная, составная с четырехугольными расчетными ячейками и адаптированная к границам области.

Во **второй главе** приводятся результаты численного моделирования течений с гомогенной конденсацией и испарением. Приводится сравнение результатов численных экспериментов с экспериментальными данными. Приводится исследование потока инертного газа аргона в системе микросопло-струя-скиммер. В модель конденсации добавлен учет испарения. Предложены численные модели для трех газов: воды, аргона и ксенона.

В разделе 2.1 рассматривается гомогенная конденсация в ударных трубах. Изучается конденсация в веере волн разрежения который возникает в структуре распада произвольного разрыва при разрыве мембраны между камерами высокого и низкого давления в ударной трубе. Гомогенная конденсация (кластерообразование) в соплах рассмотрено в разделе 2.2. Подраздел 2.2.1 посвящен описанию физической картины гомогенной конденсации в соплах.

Экспериментально процесс конденсации в соплах и струях изучался в работах Хагены и Оберта [Hagena, O.F., Obert, W., Chem, J.J. Chem. Phys. 56, 1793–1802 (1972)]. Они изучали формирование кластеров в зависимости от давления p_0 , температуры T_0 , и диаметра сопла d . С помощью полуэмпирической теории Хагены проводилась настройка параметров модели конденсации в данной работе. Для конденсации аргона лучшее совпадение с теорией Хагены было достигнуто для значений параметров $\beta = 0.1$, $g = 1.325$.

Валидация всего алгоритма расчета гомогенной конденсации в газодинамических потоках приведена в разделе 2.2.2. Численно моделируются условия эксперимента [Wyslouzil B.E, Heath C.H., Cheung J.L., Wilemski G. J. Chem. Phys., Vol. 113, No. 17, 2000, pp. 7317-7329.] по гомогенной конденсации паров воды в азоте при течении в плоском сопле (рис. 1). Давление в ресивере считалось равным 60000 Па, температура 287 К, парциальное давление паров воды в ресивере 1000 Па (массовая доля паров воды $\alpha_{\max} = 0.011$). Начало системы координат располагается в центре критического сечения сопла (рис.1).

Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов в области скачка конденсации и ниже по течению. Проведен кросс-верификационный анализ путем сравнения численного решения данной задачи методом, предлагаемым в данной работе и методом использующий кинетический подход. Численные результаты отличаются не больше чем на 2-5%.

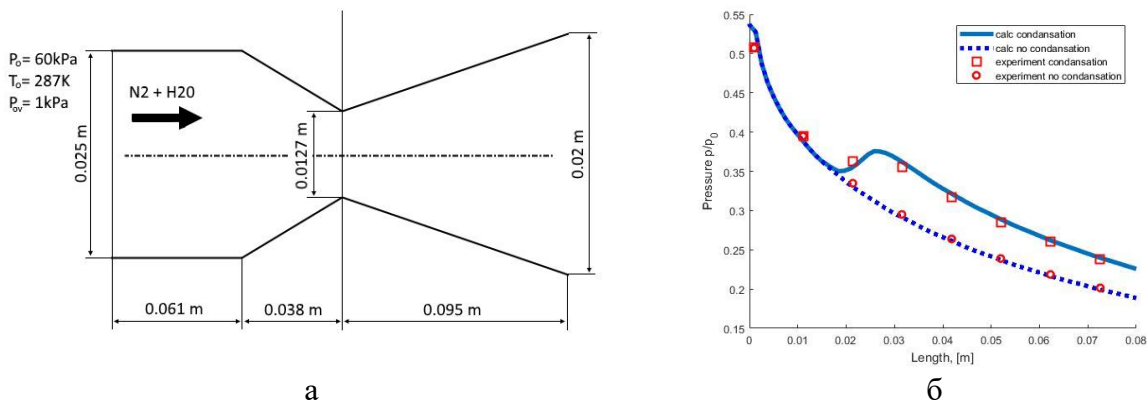


Рис. 1. Пояснение к эксперименту, а) Схема плоского сопла, б) Распределение давления на стенке сопла. Круги – эксперимент, адиабатическое течение, квадраты – эксперимент, течение с конденсацией. Пунктирная линия – расчет адиабатического течения, сплошная линия - расчет течения с конденсацией.

Проведены расчеты конденсации в сопле (рис.1) в двумерной постановке с учетом эффекта вязкости.

Раздел 2.2.3 посвящен расчету конденсации в сопле гиперзвуковой ударной аэродинамической трубы, раздел 2.2.4 - моделированию конденсации перегретого водяного пара в микросопле. В разделе 2.2.5 был изучен процесс конденсации ксенона в микросопле. Теплофизические параметры приводятся в приложении к диссертации.

Для конденсации ксенона коническое микросопло имеет следующие размеры: радиус критического сечения $r_{кр}=0.00007$ м., радиус выходного сечения $R=7 r_{кр}$., длина сверхзвуковой части $L=120 r_{кр}$. Температура в камере $T_0=293$ К, давление на входе в сопло: $p_0=3; 4; 4.5; 5$ атм. Рабочая среда - газ ксенон. Данное сопло используется в установке генерации кластерных пучков, используемой в современных технологических установках планаризации поверхностей.

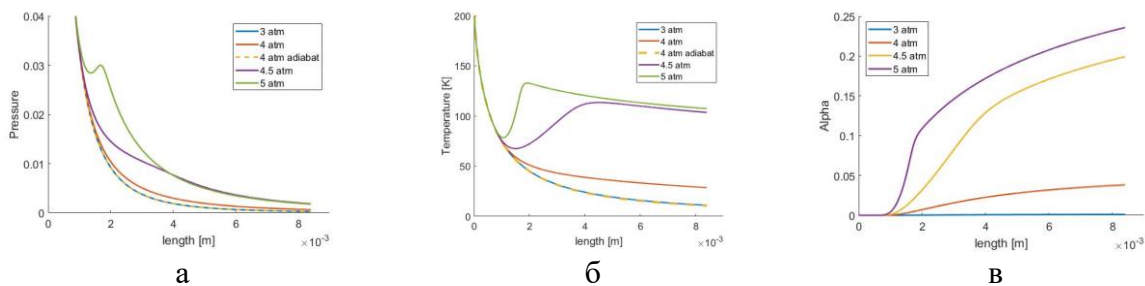


Рис. 2. Распределение физических параметров вдоль сопла; а) – безразмерное давление, б) – температура [K], в) – концентрация сконденсировавшейся фракции.

Анализ результатов рис. 2 показывает, что при давлении 3 атм. конденсация ксенона в пределах сопла не наступает. С возрастанием давления в камере сгорания сопла больше 4 атмосфер возникает конденсация и при давлении больше 4.5 атм. возникает скачек конденсации, который сдвигается влево ближе к критическому сечению при больших

давлениях. Массовая доля ксенона в жидком состоянии может достигать 25% на среде микроопла при давлении 5 атм.

В разделе 2.3 выполнено численное исследование течения газа в системе микроопла-вакуумная струя-скиммер (рис.3, 4). Эта система является частью установки для генерации кластерных пучков. Удобным способом для получения кластеров вещества является конденсация паров вещества в процессе их истечения из сверхзвукового сопла. Полученные кластеры предполагается использовать для бомбардировки поверхности интегральных схем для достижения их большего класса чистоты поверхности.

Течение в микроопле характеризуется наличием толстых пограничных слоев вблизи стенок, которые занимает большую часть внутренней области сопла (из-за маленького числа Рейнольдса). Это приводит из-за толщины вытеснения к существенному снижению реальной степени расширения потока в сопле по сравнению с геометрической степенью расширения, задаваемой контуром сопла. Наиболее сильно поток расширяется уже в ближнем поле струи за соплом.

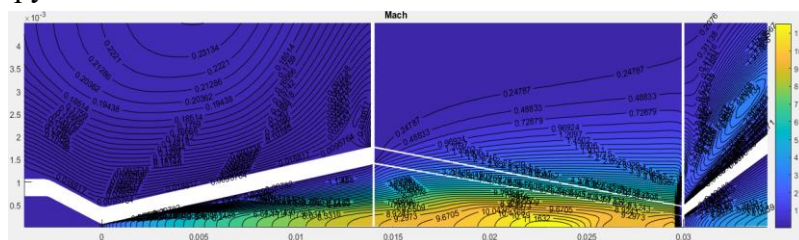


Рис. 3. Изолинии распределения числа Маха в области интереса

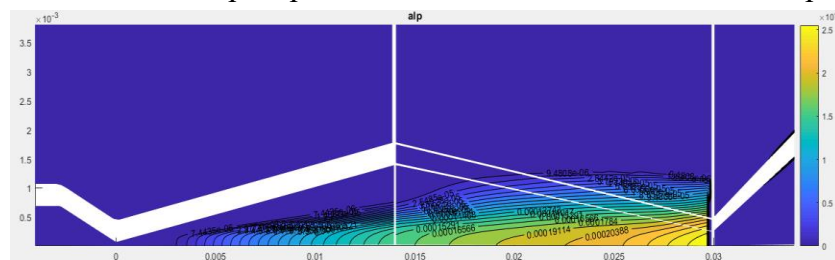


Рис. 4. Изолинии массовой доли жидкой фракции в области интереса

На рис. 4 показано, что максимальная массовая доля конденсата образуется в струе в приосевой области перед скиммером, но затем при проходе через головную ударную волну, возникающую перед скиммером жидкие капли на данном режиме почти полностью испаряются из-за повышения температуры за скачком.

Значения необходимых теплофизических параметров для аргона приводятся в приложении к диссертации.

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. Приводится сравнение результатов численных экспериментов с экспериментальными данными.

В разделах 3.1 и 3.2 изложена математическая модель гетерогенной конденсации в разделе 3.3 - математическая модель испарения гетерогенных капель.

В отличие от гомогенной конденсации гетерогенная происходит на уже существующих примесях: каплях уже сконденсировавшегося газа, саже и других мелких частицах, - которые выступают в качестве ядер конденсации. Как и для гомогенной мы рассматриваем процесс конденсации, как два последовательных этапа: нуклеации и роста капель, - но в отличие от гомогенной, гетерогенная нуклеация происходит за счет увеличения числа существующих ядер конденсации, на которые нуклеируют (присоединяются) устойчивые, гомогенные кластеры, конденсирующейся жидкости, размер которых больше критического.

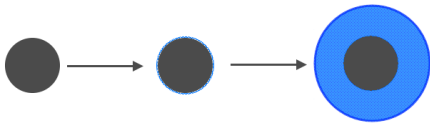


Рис. 5. Схематическое изображение процесса гетерогенной конденсации

капли равномерен во всех направлениях

В рамках подхода условимся гетерогенную нуклеацию называть активацией. Так как считается, что новых, гомогенных кластеров в таком случае не образуется.

Дополнительно предполагается, что активация частиц происходит, только для частиц, радиус которых больше чем критический радиус устойчивого гомогенного зародыша (рис. 6). Считается, что остальные частицы не участвуют в процессе гетерогенной конденсации.

Главное генерирующее уравнение, описывающее эволюцию функции распределения f^{he} гетерогенных капель по размерам будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial f^{he}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j f^{he}) + \frac{\partial}{\partial r} (r f^{he}) = J^{he}, \quad (18)$$

где J^{he} это гетерогенная функция нуклеации, представляющая скорость активации гетерогенных частиц в единице объема. Система моментных уравнений для гетерогенной нуклеации может быть получена из уравнения (18) таким же образом, как и система (1-14):

$$\frac{\partial}{\partial t} M_k^{he} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j M_k^{he}) = \varphi_k^{he} + k M_{k-1}^{he} \dot{r}, \quad k = 1, \infty, \quad (19)$$

В рамках данного подхода к моделированию гетерогенной конденсации делается предположение, что конденсация происходит в два этапа, твердая частица покрывается влагой сразу вся целиком (рис. 5), функция распределения по размерам для твердых частиц известна заранее и не изменяется, рост

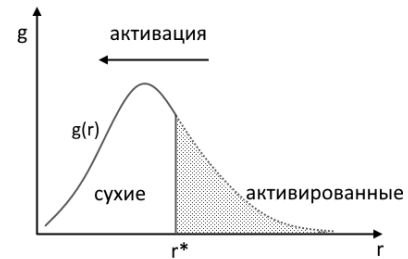


Рис .6. Схематическое изображение активации частиц

где M_k^{he} - это k-ый момент гетерогенной функции распределения f_k^{he} . Функция скорости изменения k-ого момента φ_k^{he} может быть получена из следующего соотношения:

$$\varphi_k^{he} = \int_0^\infty r^k J^{he} dr. \quad (20)$$

Для случая равномерной функции распределения инородных частиц, с распределением размеров частиц от r_{\min} до r_{\max} будет иметь следующий вид:

$$\varphi_k^{he} = \begin{cases} 0, & r_* \notin [r_{\min}, r_{\max}] \\ -\frac{g_n}{r_{\max} - r_{\min}} r_*^k \frac{dr_*}{dt} & r_* \in [r_{\min}, r_{\max}] \end{cases}, \quad (21)$$

где g_n - общее количество частиц в единице массы для сухой примеси.

Для моделирования конденсации удобно вместо третьего момента M_3^{he} удобно рассматривать уравнение для изменения массовой доли жидкости α . Для этого необходимо преобразовать уравнение для третьего момента. Учтем, что

$$\varphi_3^{he} = \frac{d}{dt} \int_0^\infty r^3 g dr = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty r^3 g dr + \frac{\partial}{\partial x_j} u_j \int_0^\infty r^3 g dr. \quad (22)$$

Отсюда для третьего момента имеем:

$$\frac{\partial}{\partial t} M_3^{he} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j M_3^{he}) = k M_2^{he} \dot{r}. \quad (23)$$

Умножив уравнение (22) на $4/3 \pi \rho_l$ (ρ_l - плотность жидкости), получим уравнение для определения массовой доли жидкости α :

$$\frac{\partial \rho \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \alpha}{\partial x_j} = 4 \pi \rho_l \dot{r} M_2^{he}. \quad (24)$$

Окончательно система уравнений для гетерогенно конденсирующегося газа в одномерной постановке будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0, \quad (26)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial u (\rho E + p)}{\partial x} = 0. \quad (27)$$

$$\frac{\partial (M_0^{he})}{\partial t} + \frac{\partial (u M_0^{he})}{\partial x} = \varphi_0^{he}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial M_1^{he}}{\partial t} + \frac{\partial u M_1^{he}}{\partial x} = \varphi_1^{he} + \dot{r} \rho M_0^{he}, \quad (29)$$

$$\frac{\partial M_2^{he}}{\partial t} + \frac{\partial u M_2^{he}}{\partial x} = \varphi_2^{he} + 2 \dot{r} \rho M_1^{he}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial \rho \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \alpha}{\partial x} = 4\pi \rho_1 \dot{r} M_2^{he}. \quad (31)$$

Здесь ρ – плотность, p – давление, T – температура статическая, u – скорость вдоль направления x , M_0, M_1, M_2 – моменты функции распределения в единице объема.

Чтобы описать неоднородность среды, введено уравнение распространения массовой доли конденсирующейся фазы α_{\max} . Это позволяет расширить класс решаемых задач. Например, это позволяет рассмотреть задачи с неоднородным содержанием конденсирующегося вещества в разных зонах расчетной области.

$$\frac{\partial(\rho \alpha_{\max})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha_{\max})}{\partial x} = 0, \quad (32)$$

где α_{\max} – это массовая доля конденсирующейся фазы.

Для моделирования испарения предполагаем, что деактивация частиц происходит по тому же пути, что и активация: для деактивации капле им необходимо достигнуть первоначальных значений размеров кластеров твердых частиц (рис. 7).

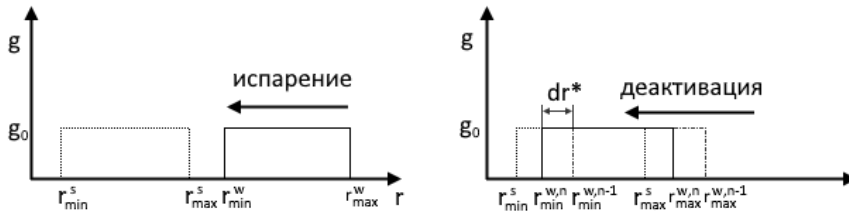


Рис. 7. Схема процессов испарение и деактивации.

При этом деактивация начинается, если минимальный радиус частиц покрытых водяной пленкой (рис. 7) r_{\min}^w достигает

максимального

радиуса первоначальных сухих частиц r_{\max}^s . Скорость деактивации частиц будет определяться из соотношения:

$$J_{deactiv} = \frac{g_0}{r_{\max}^w - r_{\min}^w} \frac{dr_{da}^*}{dt}. \quad (33)$$

Окончательно форма моментных уравнений для деактивации будет иметь вид:

$$\frac{\partial(M_0^{he})}{\partial t} + \frac{\partial(uM_0^{he})}{\partial x} = J_{deactiv}, \quad (34)$$

$$\frac{\partial M_1^{he}}{\partial t} + \frac{\partial u M_1^{he}}{\partial x} = \dot{r} \rho M_0^{he}, \quad (35)$$

$$\frac{\partial M_2^{he}}{\partial t} + \frac{\partial u M_2^{he}}{\partial x} = 2\dot{r} \rho M_1^{he}, \quad (36)$$

$$\frac{\partial \rho \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \alpha}{\partial x} = 4\pi \rho_1 \dot{r} M_2^{he}. \quad (37)$$

Для вычисления денуклеации используются значения минимальных радиусов частиц на n -ом и на слое $n-1$:

$$\frac{dr_{da}^*}{dt} = \frac{r_{\min}^n - r_{\min}^{n-1}}{dt}. \quad (38)$$

В разделе 3.4 вычислительный алгоритм расчета гетерогенной конденсации и испарения в газодинамических потоках валидировал на экспериментальных данных, полученных на ударной трубе группой ученых во главе со Смолдерсом [Smolders HJ, Nissen EMJ, van Dongen MEN. Comput Fluids 1992;21(1):63–75]. В эксперименте исследуется как конденсация, так испарение паров воды на нанометровых частицах. В эксперименте проводились измерения давления, температуры, уровня перенасыщения и среднего радиуса капель в контрольной точке на разных временных слоях в определенной "экспериментальной точке" внутри трубы.

Расчеты проводились на равномерной расчетной сетке в 2000 ячеек. Результаты на интервале времени расчетов до 90 мкс представлены на рис. 8, на котором точками показаны экспериментальные результаты, а сплошными линиями расчётные. Для давления (рис. 8а) видно хорошее совпадения с

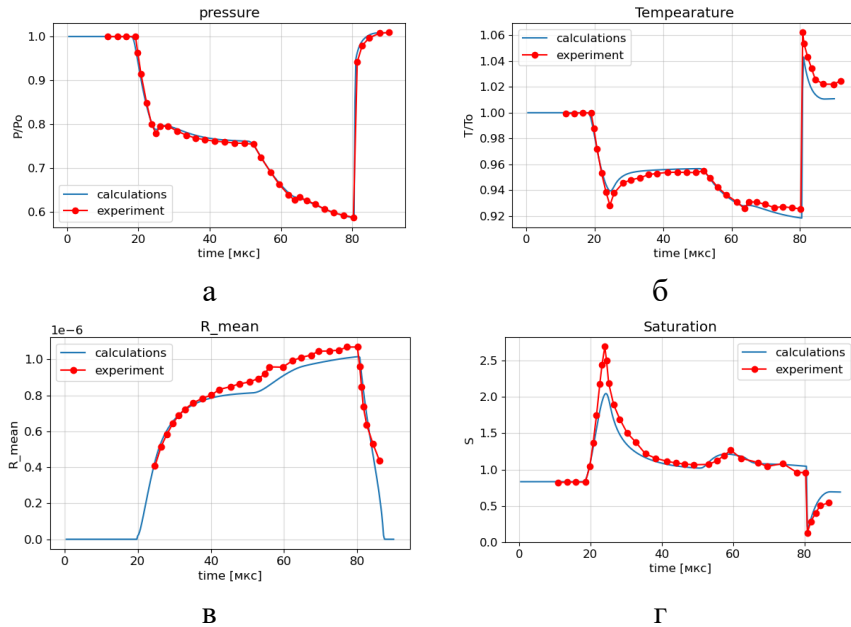


Рис. 8. Зависимость параметров от времени в экспериментальной точке: а) давление, б) температура, в) средний радиус частиц [м], г) насыщение

результатами эксперимента. Однако на рис. 8г видно, что для газа насыщение с 20 мкс по 40 мкс имеет гораздо большие пиковые значения, чем те, которые получены в эксперименте. Средний размер получаемых частиц в эксперименте перед ударной волной на 8% меньше перед ударной волной (рис. 8в). Скачок давления полученный от ударной волны вызвал резкое повышение давления, и температуры на 80 мкс. На рис. 8б видно, что рост температуры оказался меньше экспериментального за ударной волной.

В четвертой главе предложена модель гомогенно-гетерогенной конденсации, изучено возможное влияние конденсации гомогенного типа на трактовку экспериментальных результатов по гетерогенной конденсации приведенных в главе 3, проведено исследование совместного протекания гомогенной и гетерогенной конденсации в ударной трубе.

В разделах 4.1 и 4.2 разработана математическая модель гомогенно-гетерогенной конденсации, описаны численные модели, гетерогенной денуклеации, испарения и средней скорости роста капли.

В рамках подхода к моделированию конденсации данной работы используется расширенная система моментных уравнений. Дополнительно предполагается, что гомогенный и гетерогенный переходы могут происходить совместно (параллельно) и поэтому система моментных уравнений может быть представлена как совокупность двух систем моментных уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = -\frac{\rho v}{y}, \quad (39)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p - \tau_{yy})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{xy})}{\partial y} = -\frac{1}{y}(\rho v^2 - \tau_{yy}), \quad (40)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p - \tau_{xx})}{\partial y} = -\frac{1}{y}(\rho uv - \tau_{xx}), \quad (41)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(u(\rho E + p) - (v\tau_{yy} + u\tau_{xx} - q_x))}{\partial x} + \frac{\partial(v(\rho E + p) - (v\tau_{yx} + u\tau_{xx} - q_y))}{\partial y} = -\frac{v(\rho E + p)}{y}, \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_0^{ho}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_0^{ho}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_0^{ho}) = J^{ho} - \psi_0^{he} - \frac{\rho v Q_0^{ho}}{y}, \quad (43)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_1^{ho}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_1^{ho}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_1^{ho}) = r_* (J^{ho} - \psi_0^{he}) + Q_0^{ho} \dot{r} - \frac{\rho v Q_1^{ho}}{y}, \quad (44)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_2^{ho}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_2^{ho}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_2^{ho}) = r_*^2 (J^{ho} - \psi_0^{he}) + 2Q_1^{ho} \dot{r} - \frac{\rho v Q_2^{ho}}{y}, \quad (45)$$

$$\frac{\partial(\rho \alpha^{ho})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha^{ho})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \alpha^{ho})}{\partial y} = \frac{4}{3} \pi \rho_1 (r_*^3 (J^{ho} - \psi_0^{he}) + 3\dot{r} \rho Q_2) - \frac{\rho v \alpha^{ho}}{y}, \quad (46)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_0^{he}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_0^{he}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_0^{he}) = \psi_0^{he} - \frac{\rho v Q_0^{he}}{y}, \quad (47)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_1^{he}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_1^{he}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_1^{he}) = r_* \psi_1^{he} + Q_0^{he} \dot{r} - \frac{\rho v Q_1^{he}}{y}, \quad (48)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q_2^{he}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Q_2^{he}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Q_2^{he}) = (r_*)^2 \psi_2^{he} + 2Q_1^{he} \dot{r} - \frac{\rho v Q_2^{he}}{y}, \quad (49)$$

$$\frac{\partial(\rho \alpha^{he})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha^{he})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \alpha^{he})}{\partial y} = \frac{4}{3} \pi \rho_1 \rho Q_2^{he} \dot{r} - \frac{\rho v \alpha^{he}}{y}, \quad (50)$$

$$\frac{\partial(\rho \alpha_{\max})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \alpha_{\max})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \alpha_{\max})}{\partial y} = -\frac{\rho \alpha_{\max} v}{y}, \quad (51)$$

$$\frac{\partial(\ell_{\max})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \ell_{\max})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \ell_{\max})}{\partial y} = -\frac{\rho \ell_{\max} v}{y}, \quad (52)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{y} u - \frac{\partial v}{\partial x} \right], \quad (53) \quad \tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left[-\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{y} u + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \right], \quad (54)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right], \quad (55) \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (56) \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}. \quad (57)$$

Эффективная вязкость и теплопроводность определяется как сумма ламинарных λ_L , μ_L и турбулентных λ_t , μ_t составляющих:

$$\mu = \mu_L + \mu_t, \lambda = \lambda_L + \lambda_t. \quad (58)$$

Для эволюции массовых долей паров конденсирующегося вещества и твердой фракции вводятся дополнительные уравнения (51), (52):

Скорость гомогенной нуклеации связана с гетерогенной следующим образом:

$$J = J^{ho} - \psi_0^{he}. \quad (59)$$

В случае, если скорость J^{ho} меньше чем ψ_0^{he} , гомогенная конденсация не происходит, однако, в противном случае возможно как наличие гомогенной так и гетерогенной конденсации:

$$\psi_k^{he} = \frac{d}{dt} \int_0^\infty r^k \rho g dr. \quad (60)$$

Для случая равномерной функции распределения инородных частиц, с распределением размеров частиц от r_{\min} до r_{\max} будет иметь следующий вид:

$$\psi_k^{he} = \begin{cases} 0, & r_* \notin [r_{\min}, r_{\max}] \\ -\frac{\rho g_n}{r_{\max} - r_{\min}} r_*^k \frac{dr_*}{dt} & r_* \in [r_{\min}, r_{\max}] \end{cases}, \quad (61)$$

Для системы моментных уравнений (39) – (57) делается предположение, что разные виды конденсации происходят отдельно, что может привести к тому, что восстановленная функция частиц по размерам будет иметь бимодальный вид. Оба вида конденсации ведут себя по-разному: возможно появление ситуаций, когда нуклеация и активация происходит в разное время в разных частях потока.

В разделе 4.3 приведено исследование возможного влияния гомогенной конденсации в эксперименте Смолдерса. В эксперименте в КВД находился сухой воздух. Однако, если сделать предположение, что в камере высокого давления массовая доля воды была такой же, как и в остальных областях, то это может изменить результаты вычислительного эксперимента. Образование гомогенных кластеров, сопровождаемое тепловыделением, может поменять значение давления, перенасыщения и температуры (рис. 9).

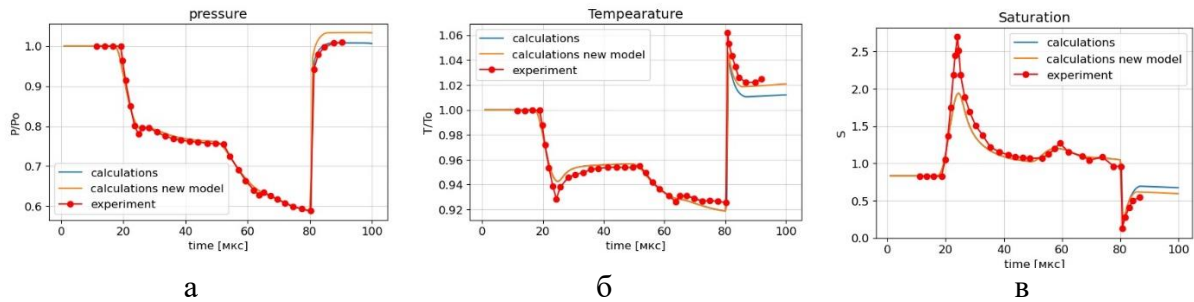


Рис. 9. Сравнение результатов эксперимента и вычислений: а) давление, б) температура, в) насыщение. Красным отмечены экспериментальные точки, синим - вычисления только в гетерогенной постановке, рыжим – результаты расчетов в гомогенно-гетерогенной постановке.

На рис. 9 видно лучшее совпадение с экспериментом по температуре и насыщению по сравнению с учетом только процесса гетерогенной конденсации. Однако давление за ударной волной стало выше. Это произошло в результате скачка гомогенной конденсации в ВВР возникшем на границе КВД и ТНД, что привело к возрастанию давления за ударной волной (рис.10). Повышение давления привело к тому что сильно возросла степень насыщения в веере волн разрежения, и гомогенная конденсация стала преобладать из-за недостаточной концентрации твердых частиц.

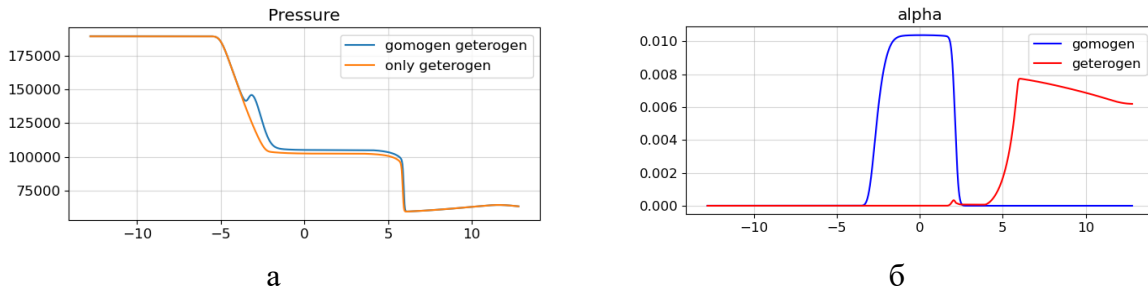


Рис. 10. Распределение параметров на 80 мкс эксперимента, а) – давление в Па, б) – массовая доля конденсата. Синим изображен график модели с учетом гомогенной конденсации, рыжим – только гетерогенный случай.

В разделе 4.4 исследуется гомогенно-гетерогенная конденсация в ударной трубе. Рассматривается начальная стадия течения, возникающего после разрыва мембраны в плоской ударной трубе. Труба имеет длину в 1 метр, заполнена влажным азотом с примесями твердых частиц, мембрана расположена точно посередине, давление в камере высокого давления $p_4=1.0$ бар, влажность $S=0.82$. В камере низкого давления $p_1=0.3$ бар, влажность $S=0.246$. Температура везде равна 295K. Массовая доля воды α_{max} в обеих камерах трубы в начале процесса 0.01375. Принимается равномерное распределение частиц в интервале

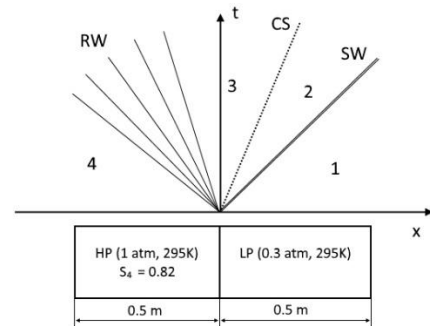


Рис. 11. X-t диаграмма течения в ударной трубе.

размеров от 15 нм до 25 нм. Для дальнейших экспериментов в модели Герца-Кнудса роста капли было взято значение β равное 0.125.

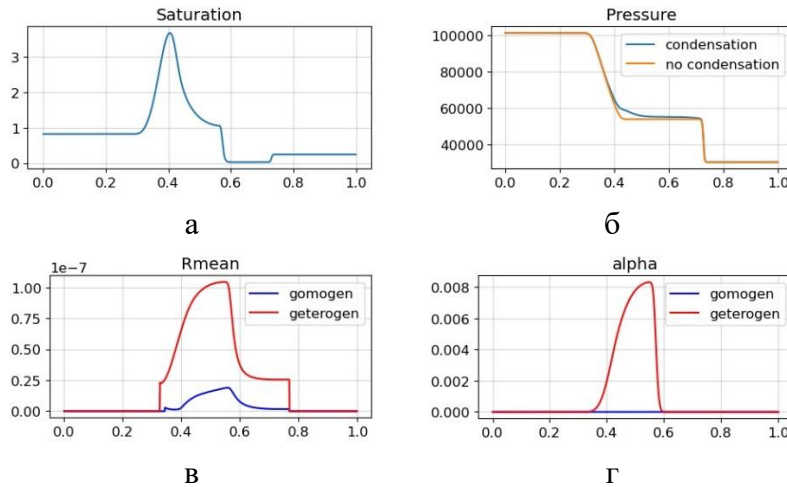


Рис. 12. Результаты численного эксперимента в ударной трубе. а) – насыщение, б) – давление, в) – средний радиус капли, г) – массовая доля конденсата

В данном численном эксперименте сделано предположение, что количество частиц в килограмме смеси равно $1.765 \cdot 10^{15} \text{ кг}^{-1}$. Концентрация твердых частиц в данном случае составит $3.0815 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$. Результаты первого эксперимента приведены на рис. 12.

В следующем численном эксперименте сделано предположение, что количество частиц в килограмме смеси равно $3.53 \cdot 10^{12} \text{ кг}^{-1}$. Концентрация твердых частиц в данном случае составит $6.163 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$. Результаты третьего эксперимента приведены на рис. 13.

Понижение количества частиц в единице массы привело к более высокому значению насыщения, еще уменьшению интенсивности скачка давления, большим значениям размеров гетерогенных капель. Однако количество гомогенного конденсата значительно выросло, а гомогенная конденсация стала преобладать над гетерогенной. Отметим, что превалирование гомогенной конденсации над гетерогенной происходит в случае, когда общая массовая доля конденсирующегося вещества (воды) на четыре порядка больше, чем массовая доля твердых частиц.

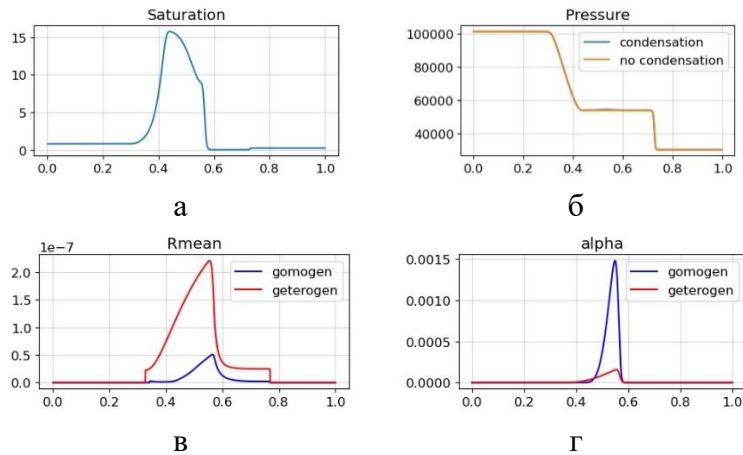


Рисунок 13. Результаты численного эксперимента в ударной трубе. а) – насыщение, б) – давление, в) – средний радиус капли, г) – массовая доля конденсата

Подобные результаты были получены и в серии экспериментов, где была повышена температура до 335 К, что привело к изменению концентрации массовой доли воды α_{\max} до 0.1206. Варьировалось только количество частиц в килограмме смеси.

В пятой главе предложен новый подход к очистке газа от чужеродных частиц с использованием эффектов конденсации и эжекции. В разделе 5.1 рассматриваются модели составных частей устройства: испарителя, эжектора, шламособорника. Дана оценка эффективности работы устройства в зависимости от количества примесей, содержащихся в газе. Приводится методика расчета физических параметров эжектора с конденсацией.

Основное внимание данной главы диссертации уделено рассмотрению потенциальной возможности увеличения инородных частиц до размеров, необходимых для их разделения в каплеуловителе. Таким образом, одним из важнейших элементов устройства для очистки газоздушных выбросов является паровоздушный эжектор.

Рабочая среда (водяной пар) поступает на вход сопла Лавалья (сопла № 1). Пар, протекающий в этом сопле, расширяется, ускоряется и охлаждается. Конденсация воды происходит внутри сверхзвуковой части сопла (зародышеобразование и рост кластера), при этом появляется конденсационное тепловыделение и изменяются газодинамические параметры потока. Двухфазная струя, состоящая из водяного пара и водяных капель, вытекающих из

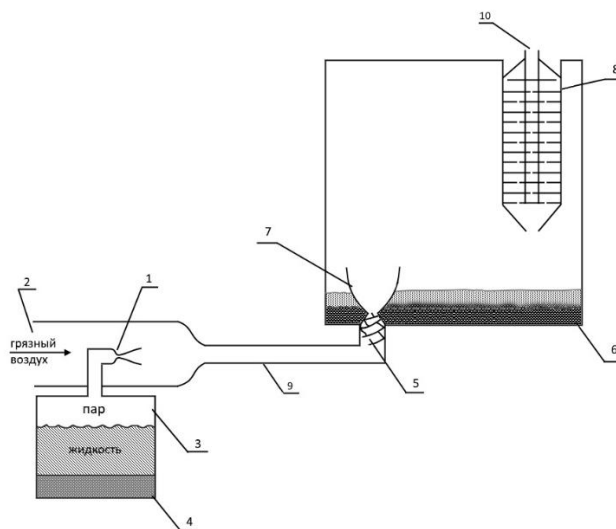


Рис. 14. Схема полезной модели.

сопла, эжектирует загрязненную газовую смесь, впрыскиваемую в приемную камеру эжектора 2 и поступает с ней в конфузор или смесительную камеру 9. Последний состоит из конической и цилиндрической частей. В конфузор газы, вытекающие из первого и второго сопел, смешиваются, сверхзвуковой поток замедляется на скачке уплотнения, и скорости постепенно выравниваются по потоку.

Математическая модель процессов в эжекторе приведена в разделе 5.2 и основывается на системе уравнений (39)-(61). Давление и температура на входе в сопло №1 $p_{in1} = 8$ бар, $T_{in1} = 437$ К, давление и температура эжектируемого (грязного газа) $p_{in2} = 1.75$ бар, $T_{in2} = 350$ К, давление в окружающей среде $p_{out} = 1$ бар.

Результаты численных расчетов показали, что гетерогенная конденсация отсутствовала до критического сечения второго сопла. При этом произошедшее перемешивание в диффузоре привело к тому, что во втором сопле возникла гетерогенная конденсация. Однако из-за недостаточной степени перемешивания и малой степени перенасыщения во втором сопле гетерогенная конденсация происходила гораздо менее интенсивно, чем гомогенная.

Количество конденсата на оси симметрии в данном случае составило около 13% (рис. 16). Большая часть гетерогенной конденсации произошла в области смешения около стенки сопла (рис. 15). В приграничной области конденсация происходит слабо из-за повышения температуры в пограничном слое.

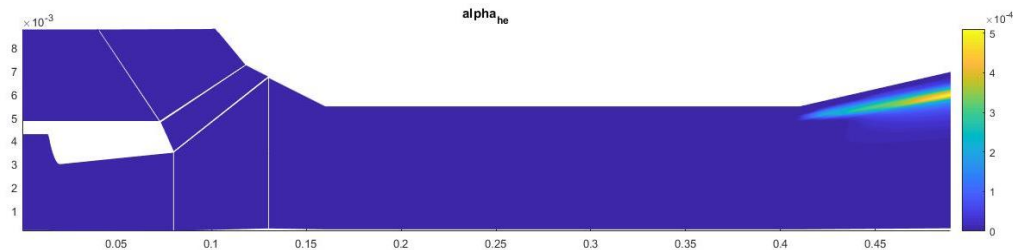


Рис. 15. Изолинии поля массовой доли воды, образовавшейся в гетерогенной конденсации

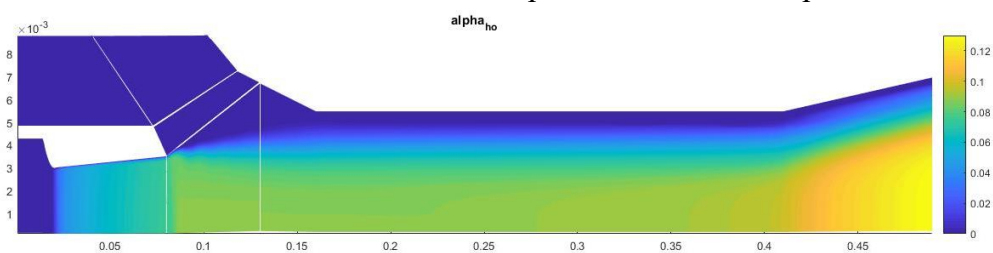


Рис. 16. Изолинии поля массовой доли воды, образовавшейся в гетерогенной конденсации

Исследование параметров на выходе из второго сопла показало, что в данном устройстве число гомогенных кластеров гораздо выше, чем гетерогенных, что препятствует большему росту гетерогенных капель. Это приводит к тому, что прирост общего объема гомогенных капель выше, чем гетерогенных, при меньшей скорости роста капли. При таких условиях гетерогенная конденсация проявляется слабо, что не позволяет каплям на твердых частицах существенно вырасти в размерах (рис. 17).

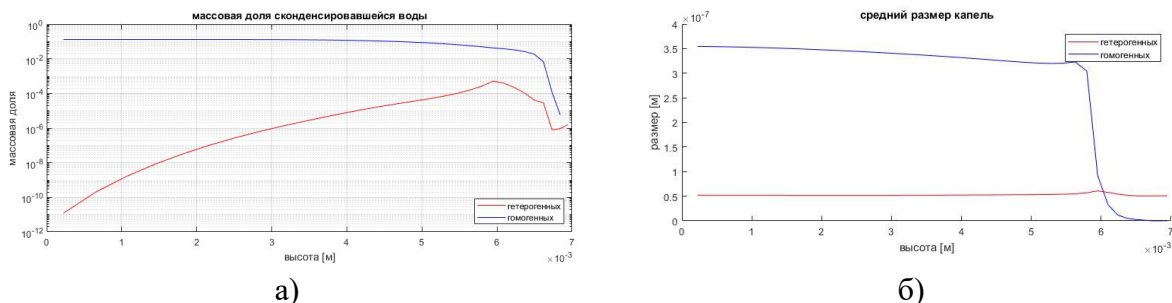


Рис. 17. Распределение параметров на срезе сопла, а) массовая доля сконденсировавшегося вещества в логарифмическом масштабе, б) средний размер капель

Потенциально получаемый размер частиц недостаточен для осуществления эффективной очистки созданием центробежной силы в устройствах циклонного типа. Однако частицы, покрытые толстым слоем жидкой оболочки, уже могут быть сепарированы другими способами. Существуют способы осаждения тумана путем создания электрических полей. Покрытие частиц водой может увеличить эффективность

электростатических фильтров. Электрический заряд может вызвать осаждение даже самых маленьких капель при использовании электрических полей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель гомогенной конденсации в вязких двухфазных потоках многокомпонентных газовых смесей в одномерной и двухмерной постановках на базе моментного метода. Возможности разработанной модели существенно расширены за счет использования дополнительного уравнения для переноса массовой доли конденсирующейся фазы (т.е. суммы массовых долей жидкой и газообразной фракции конденсирующегося вещества).
2. На базе численного метода высокого порядка построен численный алгоритм, реализующий расчет вязких течений многофазных многокомпонентных смесей в одномерной и двумерной постановках.
3. В численном эксперименте установлены оптимальные значения коэффициентов аккомодации и нуклеации для конденсации воды, аргона и ксенона на основе экспериментов и в рамках полуэмперической теории Хагены.
4. Разработаны математическая модель и метод численного моделирования гетерогенной конденсации. В математическую модель введено новое уравнение распространения массовой доли конденсирующегося вещества. Учет неравномерности массовой доли позволяет рассмотреть задачи, в которых в начальном распределении параметров в разных зонах в расчетной области задано разное содержание конденсируемого вещества или течения в каналах с изменяющимся во времени значением массовой доли конденсирующегося вещества, во входном потоке которое устанавливает связь между количеством образовавшихся гетерогенных кластеров и количеством кластеров в смеси.
5. Предложен новый подход, позволяющий вести учет наличия одновременно двух различных видов конденсации в среде гомогенной и гетерогенной при образовании кластеров в случае недостаточного количества активируемых частиц. Новый подход позволяет учесть неравномерное распространение массовой доли твердых частиц и массовой доли конденсирующегося вещества в среде.
6. В рамках диссертации предлагается один из новых способов использования конденсации. Предложен принцип осуществления очистки газов от мелкодисперсных примесей. В конструкции предлагается использовать чужеродные частицы в качестве ядер конденсации, для последующего их увеличения и осаждения укрупненных частиц.
7. Предложен новый подход к осуществлению деактивации частиц в гетерогенном случае, позволяющий вернуться к первоначальной функции распределения твердых, сухих частиц.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список опубликованных работ в ВАК и из МСЦ:

1. Назаров В. С. Приложение моментного метода для моделирования гетерогенной конденсации и испарения //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т.22, вып. 5.
2. Ivanov I.E., Nazarov V.S., Kryukov I.A. The Investigation of the Evolution of Cluster Beam Development in the Nozzle-Skimmer System в журнале Smart Innovation, Systems and Technologies, издательство Springer Nature (Switzerland), том 217, с. 69-85 (2021 г.)
3. Nazarov V.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A. Numerical study of gas-dynamic and condensation processes in an ejector device used to purify gas-air emissions в журнале IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, издательство - (Krakow), том 927, № 012063, с. 012063-1-012063-7 (2020 г.)
4. Ivanov I.E., Nazarov V.S., Gidasov V.Yu, Kryukov I.A. Numerical Simulation of the Process of Phase Transitions in Gas-Dynamic Flows in Nozzles and Jets в сборнике Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics, издательство Springer Singapore (Singapore), с. 133-151 (2020)
5. Nazarov V.S., Ivanov I.E., Kryukov I.A., Gidasov V.Y. Modeling the dynamics of a gas-droplet substance in nozzles, taking into account the phase transition в журнале Journal of Physics: Conference Series, издательство IOP Publishing ([Bristol, UK], England), том 1250, с. 012026-1-012026-10 (2019 г.)
6. Гидаспов В.Ю., Иванов И.Э., Назаров В.С., Малашин Ф.А., Крюков И.А. Исследование процесса конденсации в соплах с большой степенью расширения в журнале Физико-химическая кинетика в газовой динамике, издательство Институт механики МГУ (Москва), том 19, № 2, с. 1-17 (2018 г.)
7. Назаров В.С., Иванов И.Э., Агеев В.И., Феофилактов В.А. Результаты расчета сверхзвукового потока в канале прямоугольного сечения с колеблющейся перфорированной стенкой в журнале Вестник воздушно-космической обороны, том 3, № 15, с. 104-110 (2017 г.)
8. Назаров В.С., Ларина Е.В., Смоляков А.А., Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное исследование сверхзвукового обтекания затупленного конуса в журнале Вестник компьютерных и информационных технологий, № 8, с. 24-29 (2017 г.)

Список опубликованных работ в других изданиях

9. Назаров В.С., Численное моделирование паров воды с использованием метода моментов в сборнике Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., место издания Изд-во МАИ, с. 421-422
10. Назаров В.С., Иванов И.Э., Крюков И.А., Ципенко А.В. Численное исследование газодинамических процессов фазового перехода в эжекторном устройстве очистки

воздуха от мелкодисперсных выбросов в сборнике Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), 6–13 сентября 2020 г., Алушта, издательство Изд-во МАИ (М.), с. 240-243

11. Назаров В.С., Иванов И.Э., Крюков И.А., Гидаспов В.Ю. Численное моделирование фазовых переходов при газодинамических течениях в соплах и струях в сборнике Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019), 24-31 мая 2019 Алушта, серия ISBN 978-5-4316-0589-5, место издания Изд-во МАИ, с. 520-521
12. Назаров В.С., Гидаспов В.Ю., Крюков И.А., Иванов И.Э. Численное моделирование процесса конденсации в соплах и струях в сборнике Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24-31 мая 2018 г., Алушта, серия ISBN 978-5-4316-0491-1, место издания Изд-во МАИ Москва, том 1, с. 69-70
13. Назаров В.С., Иванов И.Э., Огарь М.А. Результаты расчета сверхзвукового потока в канале прямоугольного сечения с колеблющейся стенкой в сборнике Сборник докладов Седьмой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Москва 29 сентября 2016 г, место издания М.: ПАО "НПО "Алмаз" Москва, том 1, с. 525-533
14. Иванов И.Э., Назаров В.С. Численное исследование газодинамического тракта СО-лазера с колеблющейся стенкой в канале тракта о в сборнике Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2017), 24–31 мая 2017 г. Алушта, место издания М.: Изд-во МАИ Москва, том 1, с. 457-460
15. Гидаспов В.Ю., Иванов И.Э., Крюков И.А., Назаров В.С. Численное исследование газодинамических течений с конденсацией в соплах в сборнике XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям, место издания Балт. гос. техн. ун-т Санкт-Петербург, тезисы, с. 72-73

Патент

16. Назаров В.С., Иванов И.Э., Устройство очистки воздуха конденсационно-эжекционного типа: пат. RU198086U1, 17.06.2020