

Отзыв на диссертационную работу Назарова В.С.

“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.”

Представленная к защите диссертационная работа посвящена развитию математических моделей конденсации пара в течениях газовых смесей, проведению численного исследования процесса конденсации в различных технических устройствах, а также разработке подходов очистки газа от мелкодисперсных примесей. В работе рассматриваются модели гомогенной, гетерогенной конденсации и конденсации смешанного типа, строящиеся на базе метода моментов, применяемого к основному кинетическому уравнению для функции распределения кластеров по размерам. Для описания скорости процесса гомогенной нуклеации используются выводы классической теории нуклеации (КТН) Беккера-Дёринга-Зельдовича-Френкеля.

Следует отметить безусловную актуальность выполненного исследования. Процессы конденсации широко распространены в природе и технике. С точки зрения примеров природных явлений можно указать конденсацию водяного пара в земной атмосфере, конденсацию газов в атмосферах планет. С точки зрения технических приложений, можно отметить важную роль процессов конденсации в технологиях синтеза кластерных материалов и покрытий, упомянутых технологий очистки газа от примесей и пр.

Целями диссертационной работы является построение математической модели вязкого течения многокомпонентной сжимаемой среды с учетом возможности осуществления фазового перехода в ней, проведении численного исследования течений с гомогенной, гетерогенной конденсацией и конденсацией смешанного типа в технических устройствах и разработке подходов очистки газа от мелкодисперсных примесей.

Диссертация состоит из пяти глав.

В первой главе представлено описание используемой в диссертации математической модели процесса гомогенной конденсации для расчета течений вязкой теплопроводной смеси газов, один компонент которой может конденсироваться. Модель конденсации основана на использовании метода моментов, применяемого к основному кинетическому уравнению для функции распределения кластеров по размерам. Для расчета скорости процесса нуклеации и размера критического зародыша используется классическая

теория нуклеации. Часть главы посвящена вопросам построения численных схем расчета представленной системы уравнений.

Вторая глава посвящена изложению непосредственно результатов численного исследования для одномерных и двумерных задач о конденсации в ударных трубах, в соплах, в системе микросопло-струя-скиммер. Проводится сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов.

В третьей главе рассматривается подход для моделирования гетерогенной конденсации, также основанный на методе моментов. Модель учитывает наличие чужеродных примесей и их влияние на образование зародышей капель. Приводится сравнение результатов с экспериментальными данными.

В четвертой главе развивается модель гомогенно-гетерогенной конденсации. Исследованы процессы совместного протекания гомогенной и гетерогенной конденсации в ударной трубе.

В пятой главе описан новый подход к очистке газа от мелкодисперсных чужеродных частиц. Представлена модель для расчета процесса конденсации в турбулентном потоке.

Результаты, полученные в диссертации, отличаются новизной: развита модель гомогенной конденсации, основанная на использовании метода моментов, для сжимаемого вязкого теплопроводного газа; развиты математическая модель и метод численного моделирования гетерогенной конденсации; развит подход, позволяющий рассчитывать течения с конденсацией при наличии гомогенно-гетерогенного перехода. В диссертации предложен новый способ осуществления очистки газов от мелкодисперсных примесей.

В целом диссертация производит хорошее впечатление.

Однако по работе имеется ряд замечаний.

1) Во введении и далее по тексту диссертации упоминается классическая теория нуклеации (КТН) “Беккера-Дьюринга-Зельдовича”. Во-первых, общепринятое написание фамилии немецкого физика - Дёринг (Вернер Дёринг). Здесь можно упомянуть, например, биографии Стернина (1974г), Горбунова, Пирумова, Рыжова (1984г), да и просто данные Википедии. Во-вторых, теорию принято называть в русскоязычной литературе теорией Беккера-Дёринга-Зельдовича-Френкеля, поскольку имя Якова Ильича Френкеля также принято ассоциировать с развитием КТН. Соответствующая ссылка на работу Я.И. Френкеля имеется и в диссертационной работе (ссылка [11]).

2) Во введении сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Параграф, посвященный целям диссертации, на мой взгляд перегружен излишними деталями. Например, в перечислении целей работы фигурирует “Провести верификацию предложенных моделей и валидацию вычислительного алгоритма” и пр. На мой взгляд, цель работы должна быть сформулирована более лаконично. Возможно, за счет коррекции первого предложения параграфа - “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.” Также в упомянутой формулировке, логично было бы более явно связать “расширение области прикладных приложений” с первой частью, касающейся разработки перспективной математической модели.

3) В диссертации приводится формула (1.22) для скорости нуклеации. В формуле содержатся поправки на нестационарность процесса, кривизну поверхности капли и множитель, корректирующий начало процесса нуклеации. Однако, в описании многочисленных расчетов далее по тексту диссертации не указано использовались эти поправки или нет, и если использовались, то какие значения этих корректирующих множителей были реализованы в каждом конкретном случае. Исключением является параграф 2.3.2 “Корректировка математической модели конденсации на базе теории Хагены”, где часть параметров подбиралась с целью получения совпадения результатов расчетов автора с данными теории Хагены. Важным параметром в формуле (1.22) является коэффициент конденсации, который в общем случае может существенно отличаться от единицы. Соответствующие значения коэффициента конденсации также не указаны для представленных расчетов. Для коэффициента конденсации в диссертации используются разные обозначения.

4) Автор диссертации в расчетах гомогенной конденсации и конденсации смешанного типа (гомогенной- гетерогенной конденсации) использует выводы КТН – формулы для скорости зародышеобразования (упомянутую выше формулу (1.22) и радиуса критического зародыша. Однако широко известны недостатки КТН, к которым относятся использование понятия поверхностного натяжения для малых кластеров; предположение о равенстве температуре пара и кластеров; КТН предсказывает размер критического зародыша по числу мономеров в нем меньшим единицы для больших пересыщений и пр. Не совсем понятно, почему диссертант пользовался только выводами КТН, а не привлекал альтернативные кинетические подходы, в том числе упоминаемые в диссертации.

5) В первой главе приводится описание нескольких моделей скорости роста капли. Во-первых, в названии одной из упоминаемых моделей “Герца-Кнута” содержится опечатка, это модель Герца-Кнудсена, в которой фигурирует имя датского ученого Мартина Кнудсена, занимавшегося, в том числе, исследованиями свободномолекулярных и разреженных течений газа. Во-вторых, далее по тексту работы не ясно какие именно модели из описанных в главе использованы в тех или иных расчетах, представленных в работе.

6) Согласно выводам параграфа 1.1 следует, что автор оптимизировал систему уравнений для расчета процессов конденсации в движущемся газе, введя параметр α_{\max} , равный сумме массовых долей конденсирующегося пара и жидкой фазы и соответствующее уравнение для массовой доли конденсирующейся фазы. Однако не до конца ясно, в чем преимущества такой оптимизации, по отношению к подходам, в которых возможно использование нескольких уравнений, описывающих эволюцию во времени и пространстве массовых долей всех фракций. Если это преимущество является чисто вычислительным, то необходимы количественные оценки возможного выигрыша предлагаемого вычислительного алгоритма.

7) В параграфе 2.3.2 “Корректировка математической модели конденсации на базе теории Хагены” содержится ряд опечаток и не ясен алгоритм сравнения результатов моделирования с формулами Хагены. Во-первых, указанный параметр N представляет собой не концентрацию кластеров, а среднее число мономеров в кластере. Во-вторых, в формуле (1.40) температура торможения должна быть в отрицательной степени. Не ясен смысл параметров a и α , параметр β – обозначен, как коэффициент аккомодации, хотя скорее всего автор имел в виду коэффициент конденсации.

Формулы теории подобия Хагены предсказывают средний размер кластера в дальнем поле струи, для которого все процессы, приводящие к росту и распаду кластеров можно считать замороженными. В параграфе не хватает описания алгоритма сравнения, описания соответствующих расчетов с выделением локации в струе, для которой производился расчет среднего размера кластера.

8) В главе 3 описана модель гетерогенной нуклеации. Во-первых, при непосредственном описании модели диссертант не приводит ссылки на авторов этой модели. Во-вторых, не ясна физическая обоснованность модели, так как предполагается, что ядрами нуклеации могут быть не все частицы чужеродной фазы, а только те, чей размер превышает размер критического зародыша, который рассчитывается по параметрам конденсирующегося пара и никак не зависит от параметров самих частиц.

9) В главе 5 представлены результаты расчетов для турбулентного течения, однако оценки числа Рейнольдса для рассматриваемого течения отсутствуют.

Также не указано, какие конкретные значения коэффициента C_S в модели Смагоринского используются в представленных расчетах.

10) В диссертации не приведено подробного описания вычислительных особенностей реализации математических моделей. А именно, на каком языке написаны программы, на каких компьютерах проводились расчеты, применялись ли методы распараллеливания, если расчет проводился на кластерных компьютерах, времени счета в зависимости от типа решаемых в диссертации задач и пр.

11) На мой взгляд, результаты решения полученных задач могли бы более подробно обсуждаться с физической точки зрения. Обогатили бы содержание диссертации и дополнительные визуализированные данные, например, пространственные и/или осевые распределения скорости газа с учетом и без учета конденсации. Также в конце каждой главы неплохо было бы подвести ее основные результаты.

12) Список литературы содержит английские названия для русскоязычных оригиналов. Например, ссылка [46] на монографию Леонида Евгеньевича Стернина.

13) В диссертации приводятся редко употребляемые и не являющиеся общепринятыми термины – например, “ламинарная вязкость”.

14) Текст диссертации, включая формулы, содержит опечатки, лишь частично упомянутые в настоящем отзыве.

Несмотря на указанные замечания, работа производит хорошее впечатление. Во-первых, в работе предложено развитие математических моделей для описания крайне сложного и многогранного процесса конденсации в течениях газа. Во-вторых, разработан собственный программный код для расчета течений с гомогенной, гетерогенной конденсацией и конденсацией смешанного типа. Код может быть использован для решения одномерных и двумерных задач о течениях сжимаемого вязкого теплопроводного газа в технических устройствах с учетом наличия фазового перехода. В-третьих, положительным моментом является не только развитие указанных математических моделей автором диссертации и проведение расчетов течений в известных технических устройствах, но и предложение новой техники очистки газа от чужеродных примесей и расчет течения в соответствующей установке. Замечания, по допущенным в работе опечаткам можно частично превратить и в соответствующие плюсы так как видна полная самостоятельность автора при подготовке текста диссертации.

Считаю, что работа В.С. Назарова соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает

присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - "Механика жидкости, газа и плазмы".

Быков Н.Ю.,

д.ф.м.н,

в.н.с. Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого, профессор кафедры
физики СПбПУ

ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251

тел. 8(921)9502546

nbykov2006@yandex.ru

04.12.2021



Подпись *Быков Н.Ю.*
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам *Миссерт*
06.12.2021 г.