

Отзыв официального оппонента
о диссертации Апфельбаума Евгения Михайловича
«Законы подобия на основе идеальных линий и теплофизические свойства веществ на
фазовой диаграмме жидкостей»,
представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Теплофизические свойства различных веществ играют фундаментальную роль в различных теоретических и прикладных задачах. Последовательное определение термодинамических и теплофизических характеристик материалов в области фазового перехода между газовым и конденсированным состоянием наталкивается на существенные трудности, связанные с необходимостью решения задачи многих тел, взаимодействующих друг с другом по сложному закону. Современный подход, позволяющий преодолеть эти трудности, основан на использовании законов подобия, описывающих поведение систем в универсальном виде, не зависящем или слабо зависящем от вида потенциала взаимодействия частиц. Диссертация Е. М. Апфельбаума посвящена исследованию и построению фазовых диаграмм различных систем и веществ на основе законов подобия, связанных с идеальными линиями, а также установлению новых соотношений подобия. Для этого проанализирован большой объём экспериментальных данных для реальных газов и жидкостей и методами численно моделирования исследованы многочисленные модельные системы. Изучаемые законы подобия используются для описания многокомпонентных систем, в частности, низкотемпературной плазмы металлов, на основании чего рассчитаны теплофизические и переносные свойства такой плазмы.

Актуальность исследования.

Для установления теплофизических характеристик вещества уже развиты и успешно применяются различные экспериментальные и теоретические подходы. Но остаётся ещё целый класс веществ, таких как, например, металлы, где многие теплофизические свойства всё ещё не могут быть получены на основании экспериментов или наиболее точных и современных расчётных методов. Это относится к таким свойствам, как, например, фазовые границы или термодинамические свойства низкотемпературной плазмы металлов. Однако для решения этой задачи, как показано и в этой диссертации, применимы более простые методы, такие как законы подобия и химические модели. Первые из них помогают также установить общие закономерности для произвольной системы или вещества. Поэтому, как сама задача расчёта выбранных диссертантом теплофизических свойств, так и использование этих подходов и построенных на них методов расчёта бесспорно является актуальной задачей.

Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в ряде пунктов. Прежде всего это полученные новые соотношения подобия и новые идеальные линии, которые расширяют теоретическое представление о фазовой диаграмме различных веществ и систем. Для их получения диссертантом был обработан большой объём экспериментальных данных, включая и самые новые.

Кроме этого, диссертантом впервые была рассмотрена задача об области применимости законов подобия на основе идеальных линий. Для этого численными методами изучалось большое число модельных систем с известными потенциалами взаимодействия и впервые была установлена связь исследуемых законов подобия с параметрами потенциала. Это позволило определить область значений этих параметров, в которой применимы изучаемые соотношения. Далее на основе полученных результатов было построено уравнение для бинодали жидкость-газ, описывающее эту линию во всём диапазоне температур. Проверка этого уравнения на веществах с известной из измерений бинодалью показало, что оно обладает высокой точностью. Это дало возможность разработать новый

метод, позволяющий применить полученное уравнение для веществ, для которых имеются лишь низкотемпературные данные.

Ещё одним новым результатом является установление положения бинодалей металлов и оценки их критических точек, полученных с помощью упомянутого выше интерполяционного уравнения. На примере серы было показано, что это уравнение описывает помимо металлов также и диэлектрики.

И, наконец, впервые был рассмотрен вопрос о применении исследуемых законов подобия для веществ с переменным составом. Для этого рассматривалась низкотемпературная плазма различных металлов, которая в явном виде содержит кулоновскую компоненту. С помощью строгих аналитических выражений впервые было показано, что форма идеальной линии для давления не является более прямолинейной для таких систем даже при малых плотностях именно из-за кулоновской компоненты. Но из этих же соотношений было получено новое более слабое геометрическое подобие для упомянутой линии. Для изучения этого вопроса с учётом нейтральной компоненты была разработана новая численная программа расчёта теплофизических свойств веществ. С её помощью было подтверждено предполагаемое новое подобие, а также рассчитаны собственно теплофизические свойства (давление, внутренняя энергия, электропроводность, теплопроводность и т. д.) в этой области. При этом для ряда металлов эти данные были получены впервые.

Теоретическое и практическое значение

В работе предложен ряд новых законов подобия, которые развивают и расширяют существующие методы расчёта фазовых диаграмм. Это относится к математическим соотношениям между идеальными линиями и новому уравнению для бинодали. Кроме этого, по представленной в работе численной программе можно производить расчёты теплофизических свойств низкотемпературной плазмы различных веществ. Для результатов, уже рассчитанных и представленных в диссертации, построены простые полиномиальные аппроксимации для удобства их использования в практических задачах. Всё это обосновывает теоретическую и практическую значимость диссертации.

Достоверность и обоснованность

Для подтверждения достоверности полученных в диссертации результатов были произведены многочисленные их сравнения с данными измерений и расчётов других авторов, которое показало хорошее согласие с наиболее точными из них. Например, погрешность результатов расчёта по предложенному в диссертации уравнению для бинодали по отношению к наиболее точным экспериментальным данным не превышает 5 %, что в большинстве случаев соответствует точности измерений. Для низкотемпературной плазмы металлов результаты расчётов по предложенной диссертантом модели тоже хорошо согласуются с немногочисленными экспериментальными данными и для некоторых случаев описывают их лучше, чем даже данные расчётов по первопринципным моделям других авторов. Все основные результаты, полученные в диссертации, были доложены на многих отечественных и международных конференциях и опубликованы в авторитетных рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК и международные системы индексирования. Эти публикации хорошо известны специалистам и достаточно активно цитируются.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной теоретическому описанию термодинамического состояния систем в области фазового перехода с использованием идеальных линий и соотношений подобия, полученных на их основе.

Во **второй главе** рассматриваются идеальные линии для модельных систем с известным потенциалом взаимодействия, что позволяет построить необходимые контуры путём численного моделирования. Рассмотрены как трёхмерные, так и двумерные системы. Установлено, что форма идеальных линий связана с математической формой потенциала взаимодействия, а точнее с радиусом взаимодействия. Показано, что большинство идеальных линий сохраняет свою универсальную форму в определённом диапазоне значений этого

радиуса, и эта форма нарушается при выходе за этот диапазон. На основе полученных результатов и теории критических явлений было построено интерполяционное уравнение, описывающее бинадаль жидкость-газ во всём диапазоне температур. Тестирование этого уравнения на веществах с известной из измерений бинадалью показало, что его погрешность не превышает 5 %. Данное уравнение используется для восстановления недостающей части кривой сосуществования и оценки координат критической точки в случае, если соответствующие данные доступны лишь при низких температурах.

Третья глава посвящена описанию и результатам применения процедуры минимизации из предыдущей главы для металлов, для которых соответствующие данные недоступны из измерений или более точных методов расчёта. Рассмотрен целый ряд металлов, включая щелочные, щелочно-земельные, тугоплавкие, металлы с обратным плавлением. Для них построена кривая сосуществования жидкость-газ и оценено положение критических точек. Сравнение с оценками других авторов показало, что оно хорошо согласуется с оценками моделей из первых принципов. Так как предложенный метод построен на прямолинейности линии Зено в области жидкости, то отдельно рассматривается вопрос о переходе в закритическую область на примере ртути.

В четвёртой главе рассматривается низкотемпературная плазма металлов, а именно рассматривается вопрос о применимости изучаемых ранее законов подобия для таких сред. Для этого построена новая модель расчёта теплофизических свойств на основе химического подхода и приближения времени релаксации. С помощью разработанной модели были численно рассчитаны термодинамические свойства и электронные коэффициенты переноса для низкотемпературной плазмы ряда металлов. Причём для ряда из них, например галлия, такая информация была получена впервые. Сравнение результатов расчёта с немногочисленными экспериментальными данными в этой области показало, что результаты разработанной модели успешно описывают данные измерений, причём для ряда веществ лучше, чем данные первопринципных расчётов. Была определена и область корректного применения построенной модели и было показано, что в этой области линия Зено уже не сохраняет свою прямолинейность. На основе строгих аналитических разложений при низких плотностях было показано, что причиной этого является наличие кулоновской составляющей. Но из этих же разложений было показано, что существует более слабое, степенное подобие, которое подтверждается расчётами по построенной модели для частично ионизированной атомарной плазмы.

В целом диссертационная работа Е. М. Апфельбаума производит позитивное впечатление. Она выполнена на высоком научном уровне и является законченным научным исследованием, в котором решён ряд важных научных задач. Например, найдены новые общие соотношения подобия, выполняющиеся для широкого класса реальных веществ. Установлена область их применимости. На их основе разработан новый метод построения бинадали жидкость-газ. С его помощью положение этой линии было оценено для металлов. Была построена модель и по ней рассчитаны теплофизические свойства низкотемпературной плазмы металлов, а также найдено новое соотношение подобия для этой области фазовой диаграммы.

Несмотря на очевидные достоинства работы, к ней есть ряд **замечаний**: Так, в главе 1 отмечается, что для 10 веществ (водород, его орто- и пара-модификации, гелий, неон, дейтерий, вода, тяжёлая вода, метанол, этанол и винил хлорид) линия $Z=1$ не является прямой. В диссертации отсутствует анализ физических причин такого отклонения, результаты которого позволили бы выработать правильное отношение к законам подобия, анализируемым в работе.

Интересный вывод о неустойчивости перехода жидкость-газ для слишком короткодействующих потенциалов не анализируется подробно с физической точки зрения, что оставляет у читателя вопросы о природе подобной неустойчивости. Остается неясным, насколько реальными являются системы со столь короткодействующим взаимодействием.

Текст диссертации содержит значительное количество орфографических ошибок и других погрешностей, устранение которых могло бы существенно улучшить качество работы.

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Таким образом, рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Апфельбаум Евгений Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил
профессор кафедры Общей Физики и Ядерного Синтеза МЭИ

д. ф. -м. н. профессор



Александр Валентинович Елецкий

111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, тел. (495) 362-7865, phns.mpei.ru, e-mail:
eletski@mail.ru



Средства удостоверено

СОВМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
Л.И.ПОЛЕВАЯ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", 111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, Тел. (+7 495) 362-75-60. Сайт <https://mpei.ru>. Электронная почта: universe@mpei.ac.ru