

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

Генн. Гор.

ГОР Геннадий Юрьевич

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РОСТА
КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ПАРОГАЗОВОЙ СРЕДЕ
И ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РОСТА ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА
В РАСТВОРЕ ГАЗА В ЖИДКОСТИ

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена на кафедре статистической физики физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
ГРИНИН Александр Павлович

доктор физико-математических наук, профессор
КУНИ Федор Максимилианович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
КУРАСОВ Виктор Борисович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
СИБИРЕВ Николай Владимирович

Ведущая организация:

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук

Защита состоится 23 апреля 2009 г. в 15.00 часов на заседании совета Д 212.232.24 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9., ауд. _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Санкт-Петербургского государственного университета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н., профессор



Щекин А. К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Фазовые переходы первого рода – явления широко распространенные как в природе, так и в технике. Фундаментальной задачей при изучении фазового перехода первого рода является описание эволюции всей системы, состоящей из метастабильной фазы и зарождающихся и растущих в ней частиц стабильной фазы. Частной задачей при этом является нахождение закономерностей роста отдельной частицы новой фазы.

Зарождение и рост капель в парогазовой среде имеет первостепенное значение для физики атмосферы. В последние годы изучение процессов испарения и конденсации в атмосфере стало особенно актуально в связи с проблемой глобального потепления.

Другой важной задачей является описание роста газовых пузырьков в пересыщенном газом жидком растворе. Решение этой задачи необходимо при создании пористых материалов и полимерных пен, при производстве стекол и литье металлов, при изучении поведения вулканических газов, растворенных в магматических расплавах.

Интерес к рассмотрению нестационарных задач роста частиц стимулировал предложенный А. П. Грининым [1] новый подход к описанию кинетики начальной стадии фазового перехода (так называемое „приближение ближайшего соседа“). Этот подход учитывал неоднородность и нестационарность потребления частицами вещества.

Настоящая работа является частью исследования фазовых переходов первого рода, проводимого в течение трех десятилетий на кафедре статистической физики Санкт-Петербургского государственного университета в научной школе профессора Ф. М. Куни.

Цель работы. Целью настоящей работы является построение теоретического описания нестационарного диффузионного роста частиц новой фазы при фазовом переходе в пересыщенном паре и в пересыщенном газом растворе.

Научная новизна. Без использования дополнительных предположений о медленности роста капли со временем найдено строгое автомодельное

решение совместных нестационарных задач диффузии пара к растущей в парогазовой среде капле и отвода в парогазовую среду тепла, выделяемого каплей при конденсации пара.

Получено строгое автомодельное решение нестационарной задачи диффузии растворенного газа к растущему в пересыщенном жидком растворе пузырьку газа при таких размерах пузырька, когда силы Лапласа оказывают слабое влияние на его рост. Это решение учитывает течение несжимаемого жидкого растворителя, вызываемое движением поверхности пузырька в процессе его роста. Найдена скорость роста радиуса пузырька в зависимости от растворимости газа и пересыщения раствора. Выявлен нестационарный эффект сильного увеличения скорости роста пузырька при повышении произведения растворимости газа на пересыщение раствора.

Дано описание диффузионного роста газового пузырька с момента его флуктуационного зарождения в пересыщенном растворе, когда силы Лапласа еще существенно влияют на характер роста пузырька. Выявлено условие стационарности диффузионного потока молекул растворенного газа на пузырек, показывающее постепенный переход пузырька от стационарного роста к нестационарному. Найдено выражение для временной зависимости радиуса пузырька в стационарном и нестационарном случае. Аналитически описан выход роста пузырька на автомодельный режим.

Практическая и теоретическая ценность. Решение нестационарной задачи неизотермического роста капли может быть использовано при описании свойств атмосферных аэрозолей. Это решение дает основу для обобщения „приближения ближайшего соседа“ на неизотермический случай. При построении автомодельных решений совместных задач диффузии и теплопроводности не использовались дополнительных приближений, связанных с характерными свойствами парогазовой системы. Это оставляет возможность обобщать полученные результаты на неизотермический рост частиц в системах другой природы – например, рост капель в расслаивающихся растворах.

Нестационарное решение задачи о диффузионном росте пузырька продемонстрировало сильную зависимость скорости роста пузырька от пересыщения раствора. Большие скорости роста пузырька потребовали иного, чем традиционный, взгляда на кинетику всего процесса выделения газа из раствора.

Результаты, полученные в части диссертации, касающейся роста пузырьков, могут быть использованы в вулканологии: интенсивность извержения вулкана связана с интенсивностью роста пузырьков газов, растворенных в магме.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выносимых на защиту положений, одного приложения. Диссертация содержит 133 страницы текста, в том числе 8 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 109 названий.

Апробация работы. Основное содержание диссертации доложено на следующих российских и международных научных конференциях: III Российское совещание „Метастабильные состояния и флуктуационные явления“, г. Екатеринбург, 18-20 октября 2005; Xth Research Workshop „Nucleation Theory and Applications“, Dubna, Russia, April 1-30, 2006; XIth Research Workshop „Nucleation Theory and Applications“, Dubna, Russia, April 1-30, 2007; IV Российское совещание „Метастабильные состояния и флуктуационные явления“, г. Екатеринбург, 16-18 октября 2007; XIIth Research Workshop „Nucleation Theory and Applications“, Dubna, Russia, April 1-30, 2008; 4-th International Conference Physics of Liquid Matter: Modern Problems, Kyiv, Ukraine, May 23-26, 2008; III Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике, г. Москва, 24-28 июня 2008; Международный семинар „Фоковские чтения: современные проблемы физики“, г. Санкт-Петербург, 22-23 декабря 2008.

Актуальность и значимость исследований, результаты которых представлены в настоящей диссертации, обусловили их поддержку в рамках программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ (2006-2008 годы – проект РНП.2.1.1.1712 Фундаментальные проблемы физики и хи-

мии ультрадисперсных систем и межфазных границ и 2009-2010 годы – проект РНП.2.1.1.4430 Структура, термодинамика и кинетика супрамолекулярных систем), а также поддержку аспирантской стипендией Фонда им. К. И. Замараева за 2008 и 2009 годы, грантами правительства Санкт-Петербурга для студентов и аспирантов 2007 и 2008 годов.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ. Список публикаций приведен в конце автореферата. Личный вклад автора в опубликованные работы составляет 33,3%.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, научная новизна, ее теоретическая и практическая ценность. Описана структура работы.

В **первой главе** описано развитие представлений о конденсационном росте капель. Дан обзор работ, посвященных анализу влияния различных факторов на неизотермический рост капли. Показана важность построения нестационарного решения совместных задач диффузии пара к растущей капле и отвода тепла в окружающую каплю парогазовую среду. Освещено развитие представлений о динамике роста газового пузырька в жидкости. Показана актуальность описания роста газового пузырька в сильно пересыщенном растворе как при больших его размерах, так и при малых. Приведен обзор существующих подходов к описанию кинетики фазовых переходов. Анализ этого обзора раскрывает важность решения задач о нестационарном росте частиц.

Вторая глава диссертации посвящена решению задачи о неизотермическом росте капли жидкости при конденсации на ней пара из окружающей парогазовой смеси.

При рассмотрении роста отдельной капли главными объектами изучения являются временная зависимость радиуса капли и поле концентрации пара вокруг капли. Основная математическая трудность при описании роста капли связана с учетом граничного условия на ее движущейся поверхности.

Обычно нестационарная задача диффузии пара к растущей капле решалась приближенно [2]. Приближение основывалось на медленности роста капли, что, как правило, оправданно. Однако, приближенное решение имеет существенный недостаток: не соблюдается баланс количества конденсирующегося вещества. Тогда как этот недостаток может быть не важен при рассмотрении отдельной капли, при изучении влияния одной капли на зарождение соседней он оказывается принципиальным [1].

В работе [3] с помощью анализа размерности было показано, что задача диффузии пара к растущей капле может быть переформулирована в терминах одной безразмерной переменной (вместо двух – сферической координаты и времени). Так было построено математически точное автоматическое решение этой задачи, строго учитывающее движение поверхности капли и удовлетворяющее уравнению баланса количества конденсирующегося вещества.

Несмотря на то, что полученные в [3] результаты имеют высокую точность с математической точки зрения, описанный там изотермический случай может наблюдаться только тогда, когда в системе присутствует значительное количество пассивного газа, выполняющего роль термостата. На практике такое условие выполняется редко, и гораздо более распространён неизотермический случай, в котором необходимо учитывать изменение температуры капли и окружающей ее парогазовой смеси под влиянием выделяющейся в процессе роста капли теплоты конденсации.

Цель второй главы диссертации состояла в построении решения совместных нестационарных задач диффузии пара к растущей в парогазовой среде капле и отвода тепла от капли в окружающую парогазовую среду. При этом обе задачи решались с граничными условиями на движущейся поверхности капли.

Рассматривалась первоначально однородная парогазовая смесь при абсолютной температуре T_0 , содержащая n_0 молекул пересыщенного пара и n_g молекул пассивного газа в единице объема. В момент времени $t = 0$ в смеси флуктуационно зарождается закритическая капля и начинает необ-

ратимо расти, потребляя окружающий пар и нагревая окружающую парогазовую смесь вследствие выделения теплоты конденсации. Мы рассматривали каплю, когда ее радиус R уже значительно превысил длину свободного пробега λ молекул пара в пассивном газе. При этом перенос молекул пара удовлетворяет уравнению диффузии, а перенос тепла – уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial n(r, t)}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial n(r, t)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{\chi}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Здесь $n(r, t)$ – плотность числа молекул пара, а $T(r, t)$ – температура среды на расстоянии r от центра капли в момент времени t , D и χ – коэффициенты диффузии молекул пара в пассивном газе и температуропроводности пассивного газа. Предполагается сильное неравенство $n_g \gg n_0$, которое позволяет не учитывать различия между коэффициентами D и χ для парогазовой смеси и для пассивного газа, а также не учитывать зависимость D и χ от r и t .

Начальные и граничные условия к уравнениям (1) и (2) использовались следующие: $n(r, t)|_{t=0} = n_0$ – начальное условие однородности пара, $n(r, t)|_{r=R(t)} = n_\infty(T_d)$ – равновесное граничное условие на поверхности капли ($n_\infty(T_d)$ – плотность числа молекул насыщенного пара над плоской поверхностью жидкости при температуре капли T_d), $T(r, t)|_{t=0} = T_0$ – начальное условие однородности температуры, $T(r, t)|_{r=R(t)} = T_d$ – граничное условие равенства температуры среды у поверхности капли неизвестной пока температуре капли. Также учитывалось отсутствие потока вещества и потока тепла при $r \rightarrow \infty$. То, что температура капли T_d устанавливается на постоянном значении одновременно с установлением диффузионного режима роста капли, было показано в работе [4].

Важным будет уравнение баланса количества вещества, определяющее зависимость радиуса капли R от времени t , и уравнение баланса количества тепла, определяющее температуру капли T_d .

Следуя работе [3], введем безразмерную переменную

$$\rho = r/R(t). \quad (3)$$

При $R \gg \lambda$ плотность числа молекул пара $n(r, t)$ и температура среды $T(r, t)$ оказываются автомодельными, т. е. могут быть выражены через переменную ρ согласно $n(r, t) \equiv n(\rho)$ и $T(r, t) \equiv T(\rho)$.

При использовании безразмерной переменной ρ уравнения (1) и (2) сводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям. С учетом того, что плотность числа молекул жидкости в капле n_l значительно превышает плотность числа молекул пара, найденное для температуры капли уравнение, обеспечивающее существование автомодельного решения, может быть решено аналитически в случаях сильного и слабого проявления тепловых эффектов. В результате, в обоих случаях мы получили выражения для нестационарных полей концентрации пара и температуры парогазовой смеси вокруг растущей капли, а также выражение для скорости роста капли с учетом эффектов выделения теплоты конденсации.

Приведем выражения для нестационарных полей концентрации пара и температуры парогазовой смеси, полученные нами в случае сильного проявления тепловых эффектов $k \gg 1$

$$n(\rho) = n_0 \left[1 - \frac{\ln(1 + \zeta_0)}{k + 1} \int_{\rho}^{\infty} \frac{dx}{x^2} \exp\left(-\frac{a}{2}x^2\right) \right], \quad (4)$$

$$T(\rho) = T_0 \left[1 + \frac{k_B T_0}{q} \frac{k \ln(1 + \zeta_0)}{k + 1} \int_{\rho}^{\infty} \frac{dx}{x^2} \exp\left(-\frac{aD}{2\chi}x^2\right) \right]. \quad (5)$$

Здесь $k \equiv \left(\frac{q}{k_B T_0}\right)^2 \frac{k_B D n_0}{\kappa}$ – тепловой параметр [4], q – теплота конденсации в расчете на одну молекулу, k_B – постоянная Больцмана, κ – коэффициент теплопроводности пассивного газа, $\zeta_0 \equiv \frac{n_0 - n_{\infty}(T_0)}{n_{\infty}(T_0)}$ – начальное пересыщение пара, $a = \frac{n_0}{n_l} \frac{\ln(1 + \zeta_0)}{k + 1}$ – важный безразмерный параметр.

В третьей главе диссертации дано описание роста газового пузырька в пересыщенном газом растворе. Основной задачей при этом является нахождение зависимости радиуса пузырька R от времени t .

Объектом рассмотрения является жидкий раствор газа, в котором находится пузырек газа того же однокомпонентного вещества, что и растворенное в жидкости. Рассматриваются такие времена от момента зарождения пузырька, когда пузырек уже имеет размеры, при которых силы Лапласа можно не учитывать, т. е. когда $R \gg 2\sigma/\Pi$, где σ – поверхностное натяжение жидкого растворителя, Π – давление раствора.

Раствор предполагаем разбавленным, а газ в пузырьке идеальным. Диссоциацией и химическими превращениями растворенных молекул пренебрегаем. Температуру и давление раствора считаем заданными. Вследствие высокой теплопроводности жидкого раствора считаем всю систему из раствора и пузырька находящейся при одинаковой температуре. Под растворимостью газа в жидкости s понимаем, как обычно, безразмерную величину, равную (при заданных температуре и давлении) отношению объема газа к объему жидкости, растворившей этот газ. Степень отклонения раствора от равновесного состояния характеризуем пересыщением ζ , понимаемым как относительное отклонение начальной плотности числа молекул растворенного газа n_0 от равновесной плотности числа молекул n_∞ над плоской поверхностью раздела фаз.

В основе исследования диффузионного роста пузырька газа в пересыщенном растворе газа в жидкости обычно [5–7] лежит стационарное решение уравнения диффузии молекул газа в жидкости. Нами рассмотрено нестационарное решение уравнения диффузии молекул растворенного газа к растущему пузырьку. Более того, учтено, что диффузия молекул растворенного газа в присутствии пузырька происходит на фоне движения жидкого растворителя, вызываемого при его несжимаемости подвижностью поверхности пузырька. В [5–7] движение растворителя вовсе не рассматривалась.

Обозначив через $n(r, t)$ плотность числа молекул растворенного газа на расстоянии r от центра пузырька в момент времени t , запишем уравнение для $n(r, t)$ в виде

$$\partial n(r, t)/\partial t = D\Delta n(r, t) - \operatorname{div} [n(r, t)\vec{v}(\vec{r}, t)], \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии молекул газа в растворителе, $\vec{v}(\vec{r}, t)$ – скорость движения жидкого растворителя, имеющая в сферической системе координат с началом в центре пузырька лишь радиальную составляющую $v_r(r, t)$, для которой, в силу несжимаемости растворителя, справедливо $v_r(r, t) = \dot{R}R^2/r^2$.

Начальное и граничное условия к уравнению (6) использовались следующие: $n(r, t)|_{t=0} = n_0$ – начальное условие однородности растворенного газа и $n(r, t)|_{r=R(t)} = n_\infty$ – равновесное граничное условие на поверхности пузырька. Также учитывалось отсутствие потока вещества при $r \rightarrow \infty$. Для нахождения зависимости радиуса пузырька R от времени t использовалось уравнение баланса количества растворенного вещества.

С математической точки зрения уравнение (6) отличается от уравнения (1) диффузии молекул пара к растущей капле лишь членом, связанным с движением несжимаемого растворителя. Однако этот член не вносит в задачу каких-либо дополнительных размерных параметров, так что задача о росте пузырька при $R \gg 2\sigma/\Pi$ остается автомодельной. Тогда она может быть переформулирована в терминах безразмерной переменной ρ , определяемой аналогично (3).

При использовании безразмерной переменной ρ уравнение (6) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению и решается аналитически. При этом для скорости роста пузырька получается выражение

$$dR^2/dt = 2Db, \quad (7)$$

где важный безразмерный параметр b находится из уравнения

$$s\zeta = be^{3b/2} \int_1^\infty \frac{dx}{x^2} e^{-bx^2/2 - b/x}. \quad (8)$$

При $(s\zeta)^{1/2} \ll 1$ уравнение (8) переходит в асимптотическое равенство $b = s\zeta$. Это дает для скорости роста пузырька $dR^2/dt = 2Ds\zeta$, что совпадает с результатами, полученными в приближении стационарности процесса диффузии.

С ростом произведения $s\zeta$ равенство $b = s\zeta$ нарушается, а, начиная с $s\zeta \geq 10$, с хорошей точностью действует другое асимптотическое равен-

ство: $b = 6(s\zeta)^2/\pi$. Это дает для скорости роста $dR^2/dt = 12D(s\zeta)^2/\pi$, что демонстрирует эффект сильного увеличения скорости роста пузырька при повышении произведения растворимости газа на пересыщение раствора. Данный эффект не мог быть обнаружен в рамках стационарной теории [5–7].

Нами показано, что условия применимости теории, связанные с предполагаемым выше тепловым и механическим равновесием между пузырьком и раствором, соблюдаются при $s\zeta < 20$ (при характерных в обычных условиях значениях параметров для воды как жидкого растворителя).

В **четвертой главе** диссертации описан диффузионный рост газового пузырька в пересыщенном растворе газа в жидкости с момента его флуктуационного зарождения и до тех пор, пока роль сил Лапласа остается существенной, т. е. до его выхода на автомодельный режим роста (исследованный в третьей главе диссертации).

Учет сил Лапласа вводит в теорию размерный параметр, связанный с поверхностным натяжением жидкого растворителя σ . Это нарушает автомодельность задачи диффузии растворенного газа к пузырьку. При отсутствии свойства автомодельности решение нестационарной задачи диффузии с граничным условием на движущейся поверхности пузырька затруднительно; поэтому в данной главе рассматривалось сначала стационарное решение задачи диффузии, а затем приближенными методами строилось решение нестационарной задачи.

Силы Лапласа влияют как на плотность числа молекул газа в пузырьке, так и на равновесную плотность числа молекул n_R растворенного газа у его поверхности. Плотность n_R отличается от плотности n_∞ и находится по закону Генри. При стационарности диффузионного потока молекул растворенного газа на пузырек для скорости $\dot{R} \equiv dR/dt$ роста радиуса пузырька нами получено

$$\dot{R} = Ds\zeta \left(1 - \frac{R_c}{R}\right) \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1 + R_\sigma/R}\right), \quad (9)$$

где $R_c \equiv 2\sigma/\Pi\zeta$ – радиус критического пузырька, $R_\sigma \equiv 4\sigma/3\Pi$ – характер-

ный радиус пузырька. Флуктуационное (гомогенное) зарождение газовых пузырьков в растворе возможно лишь при высоких значениях пересыщения ($\zeta \sim 10^3$), что обеспечивает сильное неравенство $R_\sigma \gg R_c$. В качестве начального условия к уравнению (9) выбрано и обосновано условие $R|_{t=0} = 2R_c$ для „заметно закритического пузырька“, рост которого происходит уже регулярно при пренебрежимо малом влиянии флуктуаций.

В процессе роста пузырька выделены три характерные стадии. Первая стадия соответствует росту пузырька с увеличивающейся скоростью. На второй стадии рост пузырька замедляется. Третья стадия, на которой скорость роста продолжает уменьшаться, наступает при $R = R_\sigma$, когда вклад сил Лапласа в давление газа в пузырьке становится сравнимым с давлением в растворе. Третья стадия с течением времени выходит на автомодельный режим роста.

Найдены времена протекания каждой стадии роста, а также интервалы изменения радиуса пузырька и ограничения, накладываемые предположением о стационарности. Показано, что по мере увеличения радиуса условие применимости стационарного приближения становится все более жестким, и рост пузырька переходит, как правило, в нестационарный режим. То, что при характерных значениях пересыщения раствора и растворимости газа в начале первой стадии (при $0 \leq R - 2R_c \ll R_c$) рост пузырька стационарен и описывается уравнением (9), а при $R \gg R_\sigma$ автомоделен и описывается уравнением (7), дает основу для построения интерполяционной формулы для скорости роста \dot{R} радиуса пузырька.

Построенная интерполяционная формула позволяет найти зависимость радиуса пузырька от времени при нестационарности диффузионного потока молекул растворенного газа на пузырек, и описать выход роста пузырька на автомодельный режим. Как для стационарного случая, так и для сильно нестационарного, найдены значения радиуса пузырька и времени, начиная с которых зависимость радиуса пузырька от времени выходит на автомодельный закон $R = (2Dbt)^{1/2}$.

В заключении диссертации сформулированы основные положения,

выносимые на защиту:

1. Найдено строгое автомодельное решение совместных нестационарных задач диффузии пара к растущей в парогазовой среде капле и отвода в парогазовую среду тепла, выделяемого каплей при конденсации пара. Это решение не использует дополнительных предположений о медленности изменения радиуса капли со временем и строго учитывает граничные условия для задач диффузии и теплопроводности на движущейся поверхности капли.
2. Получено уравнение для температуры капли, обеспечивающее существование автомодельного решения. Для предельных случаев сильного и слабого проявления тепловых эффектов уравнение для температуры капли решено аналитически.
3. Найдено строгое автомодельное решение нестационарной задачи диффузии растворенного газа к растущему в пересыщенном растворе пузырьку. Решение учитывает течение несжимаемого жидкого растворителя, вызываемое движением поверхности пузырька в процессе его роста. Найдена скорость роста радиуса пузырька в зависимости от растворимости газа и пересыщения раствора. Выявлен нестационарный эффект сильного увеличения скорости роста пузырька при повышении произведения растворимости газа на пересыщение раствора.
4. Дано описание диффузионного роста газового пузырька с момента его флуктуационного зарождения в пересыщенном растворе, когда силы Лапласа еще существенно влияют на характер роста пузырька. Выявлено условие стационарности диффузионного потока растворенного газа на пузырек. Прослежены три показательные стадии роста пузырька. Показано, что при требуемых высоких значениях начального пересыщения раствора и реальных значениях растворимости, газовый пузырек в процессе своего многостадийного роста переходит, как правило, в нестационарный режим.
5. Предложена интерполяционная формула для скорости роста радиуса пузырька при нестационарности диффузионного потока на пузырек,

учитывающая влияние сил Лапласа на рост пузырька. Найдено аналитическое выражение для временной зависимости радиуса пузырька. Аналитически описан выход роста пузырька на автомодельный режим.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. *Гринин А. П., Жувикина И. А., Гор Г. Ю.* Автомодельное решение для нестационарных полей концентрации пара и температуры парогазовой смеси в окрестности растущей капли // *Метастабильные состояния и фазовые переходы*. Сб. научн. тр. Вып. 8. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С. 95-102.
2. *Гринин А. П., Гор Г. Ю., Кунн Ф. М.* Автомодельная теория неизотермической конденсации пара на растущей в парогазовой среде капле // *Коллоид. журн.* 2008. Т. 70, № 2. С. 181-190.
3. *Grinin A. P., Gor G. Yu., Kuni F. M.* Non-steady Theory of Heat Effects at Droplet Diffusional Growth / *Schmelzer J. W. P., Röpke G., Priezhev V. B. Nucleation Theory and Applications*. Dubna: JINR, 2008. Pp. 81-96.
4. *Grinin A. P., Gor G. Yu., Kuni F. M.* Self-similar solution of a nonsteady problem of nonisothermal vapour condensation on a droplet growing in diffusion regime // *J. Phys. Chem. C*. 2009. V. 112(48). Pp. 19069-19079.
5. *Гор Г. Ю., Гринин А. П., Кунн Ф. М.* Автомодельный диффузионный рост пузырька в растворе при произвольной растворимости газа. Учет вызываемого пузырьком движения растворителя // *IV Российское совещание Метастабильные состояния и флуктуационные явления*. г.Екатеринбург, 16-18 октября 2007, тезисы докладов. С. 18.
6. *Grinin A. P., Kuni F. M., Gor G. Yu.* Non-steady effect of rapid increase of bubble growth rate with the increase of solution supersaturation // *4-th International Conference Physics of Liquid Matter: Modern Problems*, May 23-26, 2008, Kyiv, abstracts. P. 113.
7. *Гринин А. П., Кунн Ф. М., Гор Г. Ю.* Нестационарная теория диффузионного роста пузырька газа в пересыщенном газом растворе // *III Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике*, г. Москва, 24-28 июня 2008, резюме докладов. С. 21.

8. *Гринин А. П., Кунн Ф. М., Гор Г. Ю.* Диффузионный рост пузырька в газированном растворе при учете вызываемого пузырьком движения растворителя // *Метастабильные состояния и фазовые переходы*. Сб. научн. тр. Вып. 9. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 65-75.
9. *Кучма А. Е., Гор Г. Ю., Кунн Ф. М.* Стационарный рост газового пузырька в сильно пересыщенном растворе газа в жидкости // *Научное приборостроение*. 2008. Т. 18, № 4. С. 124-128.
10. *Гринин А. П., Кунн Ф. М., Гор Г. Ю.* Теория нестационарного диффузионного роста пузырька газа в пересыщенном растворе газа в жидкости // *Коллоид. журн.* 2009. Т. 71, № 1. С. 47-55.

Цитируемая литература

1. *Grinin A. P., Zhuvikina I. A., Kuni F. M., Reiss H.* Role of nearest-neighbor drops in the kinetics of homogeneous nucleation in a supersaturated vapor // *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 121. Pp. 12490-12497.
2. *Фукс Н. А.* Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 92 с.
3. *Аджемян Л. Ц., Васильев А. Н., Гринин А. П., Казанский А. К.* Автомоделное решение задачи диффузии пара к зародившейся и растущей в парогазовой среде капле // *Коллоид. журн.* 2006. Т. 68, № 3. С. 418-420.
4. *Кунн Ф. М.* Эффекты теплоты перехода в кинетике конденсации. 3. Скорость свободномолекулярного и диффузионного роста закритических капель // *Коллоид. журн.* 1985. Т. 47, № 2. С. 284-293.
5. *Кунн Ф. М., Жувикина И. А., Гринин А. П.* Теория гомогенного вскипания жидких растворов. 3. Рост закритических пузырьков при учете летучести растворителя // *Коллоид. журн.* 2003. Т. 65, № 2. С. 227-231.
6. *Слезов В. В., Абызов А. С., Слезова Ж. В.* Зарождение газонаполненных пузырьков в маловязких жидкостях // *Коллоид. журн.* 2004. Т. 66, № 5. С. 643-652.
7. *Слезов В. В., Абызов А. С., Слезова Ж. В.* Кинетика распада пересыщенной газом маловязкой жидкости на переходной и поздней стадиях // *Коллоид. журн.* 2005. Т. 67, № 1. С. 94-105.