

На правах рукописи

САХАРОВА Наталия Александровна

**ВЛИЯНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ
СТАЦИОНАРНЫХ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ В СРЕДАХ С
ОБЪЕМНЫМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕМ**

Специальность 01.04.17 – химическая физика,
в том числе физика горения и взрыва

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2010

Работа выполнена на кафедре молекулярной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Уваров Александр Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Чуйко Сергей Васильевич
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Чеботарев Андрей Васильевич

Ведущая организация: НИИ прикладной математики и механики
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Защита состоится “ 24 ” февраля 2010 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 501.002.01 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, физический факультет, аудитория 1-31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан “ 22 ” января 2010 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.002.01,
кандидат физико-математических наук

Т.В. Лаптинская

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из актуальных задач химической физики является изучение неравновесных сред и протекающих в них кинетических и гидродинамических процессов. Параметры неравновесных систем, условия, при которых происходят скачкообразные изменения стационарных состояний (тепловой взрыв, контракция разряда) всегда занимали важнейшее место в исследованиях. Однако влияние свободной конвекции на такие системы исследовано очень слабо, поскольку, как правило, в инженерных расчетах используются «эффективные» усредненные значения коэффициентов переноса, которые косвенно учитывают конвекцию, а в кинетических исследованиях теплопроводность и диффузия описываются с помощью простейшей модели молекулярного переноса. В то же время, в случае, когда числа Рэлея достаточно велики, влияние конвекции становится определяющим, и она очень существенно меняет поля температур и концентраций. При объемном энерговыделении, зависящим от поля температур, ключевым моментом оказывается не усредненное, а максимальное значение температуры, а также взаимосвязь кинетических процессов и процессов гидродинамического переноса. Таким образом, возникает актуальная задача совместного рассмотрения энерговыделения, кинетических и гидродинамических процессов и их влияния на параметры неравновесных систем.

Целью диссертационной работы является решение задачи расчета параметров стационарного состояния неравновесной среды с одновременным учетом трех факторов: энерговыделения, кинетических процессов и гидродинамического движения в системе, возникающего за счет свободной конвекции.

Научная новизна работы

1. В связи с оценкой эффективности работы лазеров в схеме коаксиальных цилиндров сформулирована и решена задача о распределении температур в системе коаксиальных цилиндров при постоянном и однородном объемном энерговыделении, в том числе и при разных температурах поверхностей цилиндров. Рассматривалось как горизонтальное, так и вертикальное расположение цилиндров. Впервые рассчитаны зависимости максимума температуры в среде от числа Рэлея (определяемого разностью температур поверхностей), модифицированного числа Рэлея (определяемого объемным энерговыделением) и геометрии задачи.

2. Показано, что конвективный теплоотвод в среде между коаксиальными цилиндрами затруднен по сравнению с обычным полым цилиндром. В связи с этим, начиная с определенных чисел Рэлея, максимальная температура в системе при обычной цилиндрической геометрии оказывается меньше по сравнению с максимальной температурой в системе коаксиальных цилиндров. Таким образом, коаксиальная геометрия в рассматриваемом диапазоне параметров оказывается менее эффективной по сравнению с обычной цилиндрической с точки зрения теплоотвода, что подтверждается и экспериментально.

3. Сформулирована и решена задача о тепловом взрыве в цилиндрическом объеме при учете свободной конвекции и кинетических процессов прямых и обратных реакций в системе. Тем самым получено обобщение задачи Франк-Каменецкого о тепловом взрыве на случай свободной конвекции в реагирующей системе.

4. Показано, что свободная конвекция существенно меняет начальные параметры теплового взрыва для цилиндрической геометрии задачи, особенно в области скачкообразного перехода системы в новое стационарное состояние. Свободная конвекция увеличивает критическое число Франк-Каменецкого, а

также полностью меняет параметры гистерезиса в районе точки теплового взрыва.

5. Впервые решена задача о распределении термодинамических параметров и концентрации электронов и молекулярных ионов в положительном столбе тлеющего разряда в инертном газе с учетом свободной конвекции для давлений порядка 100 Тор. Показано, что конвекция существенно перестраивает распределение параметров положительного столба тлеющего разряда. Она влияет как на процесс теплопереноса, так и на процесс амбиполярной диффузии.

6. Впервые рассчитаны профили термодинамических параметров и вольт-амперные характеристики в положительном столбе тлеющего разряда в неоне при учете свободной конвекции. Найдены диапазоны токов, напряжений и давлений, в которых влияние свободной конвекции становится существенным. Проведено сравнение с экспериментальными результатами. Показано, что строгая кинетическая модель разряда при промежуточных давлениях не может быть построена без учета свободной конвекции.

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы заключается в построении последовательной теории для расчета параметров неравновесных систем с учетом свободной конвекции. Такой расчет выполнен впервые. Работоспособность теории подтверждается совпадением с известными результатами при малых числах Рэлея, а также наличием наблюдаемых эффектов в эксперименте.

Практическая ценность работы заключается в анализе режимов, моделирующих тепловые эффекты в реальных лазерах и разрядах.

Основные положения, выносимые автором на защиту

1. Формулировка задачи о влиянии свободной конвекции на параметры стационарных неравновесных систем с объемным энерговыведением, позволившая в рамках единого подхода:

- найти зависимость максимальной температуры в системе от чисел Рэлея и геометрии задачи для системы коаксиальных цилиндров;
- получить численное решение задачи о тепловом взрыве с учетом обратных кинетических процессов при наличии свободной конвекции в горизонтальном цилиндре;
- рассчитать вольт-амперные характеристики и распределение параметров в положительном столбе тлеющего разряда для давлений 50-500 Тор с учетом свободной конвекции.

2. Результаты расчета параметров системы горизонтальных и вертикальных коаксиальных цилиндров, позволившие сравнить эффективность использования такой геометрии для лазерных задач по сравнению с обычной цилиндрической системой.

3. Результаты анализа влияния конвекции на параметры, при которых возникает тепловой взрыв, и на гистерезисную петлю в горизонтальном цилиндре, показывающие необходимость учета конвективного теплоотвода при любых расчетах газовых лазеров и разрядов в рассматриваемом диапазоне давлений.

4. Результаты расчета вольт-амперных характеристик и распределения параметров для положительного столба тлеющего разряда в области промежуточных давлений, когда влияние свободной конвекции оказывается существенным. Показано, что модели, учитывающие достаточно сложные кинетические схемы, но использующие упрощенный анализ теплопроводности и диффузии без процессов конвекции, следует признать достаточно грубыми.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих общероссийских и международных конференциях:

1. Minsk International Colloquium on Physics of shock waves, combustion, detonation and non equilibrium processes (Minsk, MIC 2005)
2. Международная конференция студентов и аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам « Ломоносов - 2004» (Москва, МГУ, 2004)
3. XI Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ. (Санкт-Петербург, 2005)
4. IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. (Нижний Новгород, 2006)
5. IV Всероссийская конференции по необратимым процессам в природе и технике (Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007)

По результатам работы опубликованы 3 статьи в реферируемых научных изданиях и тезисы к 5 докладам на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем 93 страницы, в том числе 24 рисунка. Список литературы содержит 77 наименований.

2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, её научная новизна и практическая ценность. Формулируются цели работы и постановка научной задачи. Излагаются основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе рассматривается влияние свободной конвекции на теплообмен для системы коаксиальных цилиндров с учетом постоянного объемного энерговыделения.

В **параграфе 1.1** рассматривается проблема охлаждения газовых лазеров, преимущества и недостатки различных схем охлаждения.

Параграф 1.2 посвящен расчету параметров среды в системе горизонтальных коаксиальных цилиндров с постоянным энерговыделением.

Для описания системы использованы цилиндрические координаты (R, θ) , угловая координата θ отсчитывается от вертикальной плоскости симметрии против часовой стрелки.

Система уравнений гидродинамики в приближении Обербека-Буссинеска имеет вид:

$$\nabla^2 \psi = -\omega + \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \omega = \frac{1}{\text{Pr}} \left[\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \right] + Ra_T \left[\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \cos \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right] \quad (2)$$

$$\nabla^2 \varphi = u \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - 1 + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3)$$

относительно переменных ψ , ω , φ с двумя безразмерными параметрами - числом Прандтля $\text{Pr} = \mu c / \lambda$ и модифицированным числом Рэлея $Ra_T = \rho g \beta L^3 T_0 q / (\mu \chi)$ (g – ускорение свободного падения, β - коэффициент теплового расширения, ρ - плотность газа, c - теплоемкость при постоянном

давлении, μ - коэффициент динамической вязкости, $\chi = \lambda / (c\rho)$ - коэффициент температуропроводности).

Функция тока Ψ задана следующим образом:

$$U = R^{-1} \partial \Psi / \partial \theta, V = -\partial \Psi / \partial R. \quad (4)$$

Где U и V – компоненты скорости, а безразмерные величины:

$$\psi = \frac{\Psi}{\chi}, \quad r = \frac{R}{L}, \quad \varphi = \frac{T - T_0}{T_0 q}, \quad u = \frac{UL}{\chi}, \quad v = \frac{VL}{\chi}, \quad q = \frac{QL^2}{\lambda T_0}, \quad (5)$$

где $L = R_o - R_i$, Q - мощность внутреннего энерговыделения на единицу объема, R_o и R_i - радиусы внешнего и внутреннего цилиндров соответственно.

Для удобства расчета введена завихренность ω , представляемая в виде:

$$\omega = -\nabla^2 \psi, \quad (6)$$

$$\text{где } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, \quad (7)$$

– лапласиан в цилиндрических координатах.

Полагалось, что угловые производные температуры и завихренности на плоскости симметрии исчезают. Вдоль стенок завихренность принимает следующий вид:

$$\omega = -\partial^2 \psi / \partial r^2. \quad (8)$$

Таким образом граничные условия, на плоскости симметрии

$$\psi = \omega = \partial \varphi / \partial \theta = 0, \quad (9)$$

а на внутреннем и внешнем цилиндрах

$$\psi = u = v = 0, \quad \omega = -\partial^2 \psi / \partial r^2, \quad \varphi|_{r=r_i} = Ra / Ra_T, \quad \varphi|_{r=r_o} = 0. \quad (10)$$

где число Рэлея $Ra = \rho g \beta L^3 (T_i - T_o) / (\mu \chi)$, T_o и T_i - температуры поверхностей внешнего и внутреннего цилиндров соответственно.

В результате расчета найдены критические зависимости $Ra(Ra_T)$ при фиксированной величине $\sigma = \frac{2r_i}{r_o - r_i}$. На рисунке 1 изображена плоскость

$Ra(Ra_T)$ при $\sigma = 2$.

В соответствии с результатами расчета можно выделить четыре области.

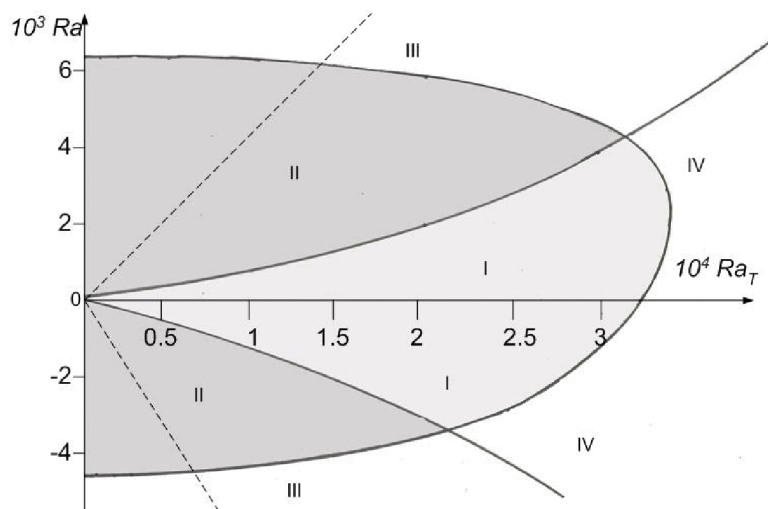


Рис. 1 – Зависимость $Ra(Ra_T)$ для $\sigma=2$

В области I конвекция наблюдается с образованием двух вихрей, в области II образуется только один вихрь. В областях III и IV происходит образование системы более мелких вихрей. В области II градиент температуры по радиусу имеет только один знак, в области I – знак градиента меняется, однако внутри каждого из вихрей градиент не меняет знака.

Для сравнения на рисунке 1 представлены пунктирные прямые, отделяющие диапазон значений Ra/Ra_T , между которыми в случае отсутствия конвекции наблюдается немонотонный профиль температуры. Сравнение положения этих пунктирных кривых и границы раздела областей I и II показывает, что конвекция очень сильно перестраивает профиль температуры.

Типичная картина изотерм и линий тока изображена на рисунке 2.

Как видно из рисунка, наблюдается сильная неоднородность распределения температуры по углу.

На рисунке 3 представлены зависимости предельной температуры, достигаемой в системе $\varphi_{\max} = (T_{\max} - T_0)/(qT_0)$ от модифицированного числа Рэлея при разных значениях σ .

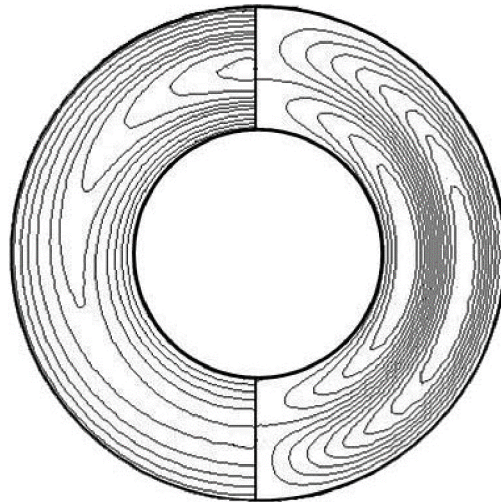


Рис. 2 – Изотермы и линии тока при $\sigma=2, Ra = 1 \cdot 10^2, Ra_T = 3 \cdot 10^4$
(область I на рис.1)

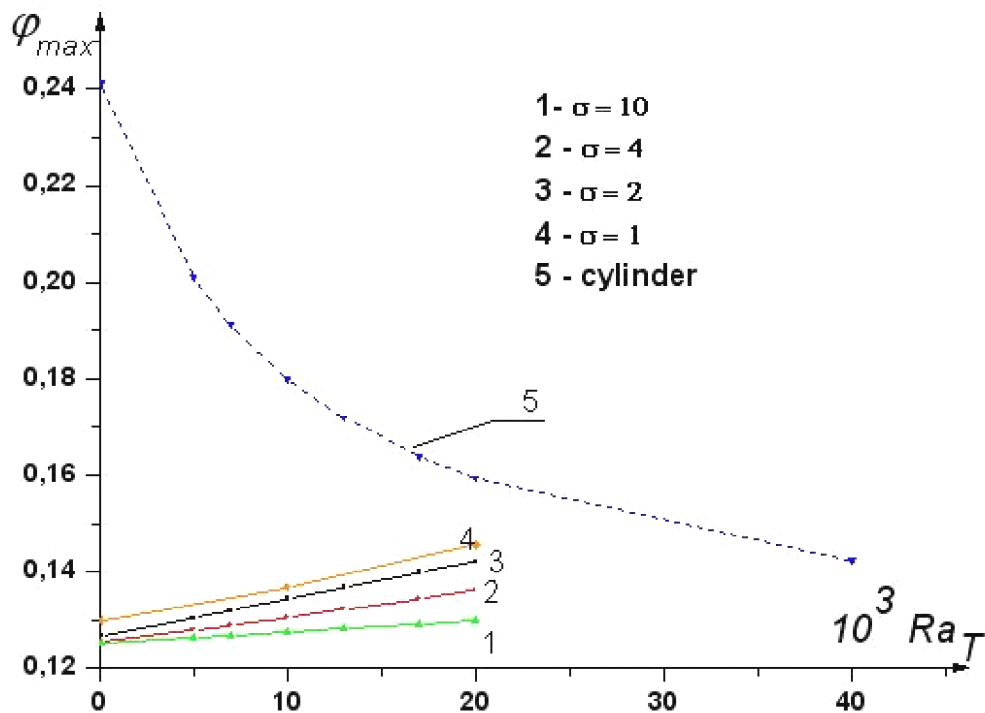


Рис. 3 – Зависимость максимальной температуры φ_{\max} от Ra_T при разных значениях σ

В случае отсутствия конвекции при $Ra_T = 0$ коаксиальная геометрия позволяет снизить в два раза максимальную температуру в системе.

Для цилиндра с увеличением энерговыделения эта температура падает и при некотором значении Ra_T она становится даже меньше, чем в случае с коаксиальными цилиндрами. Как видно из графика, с увеличением Ra_T предельное значение температуры для случая коаксиальных цилиндров растет. Причиной этого является существование двух вихрей.

Действительно, если рассмотреть верхнюю область системы коаксиальных цилиндров и сравнить энергопотоки с учетом и без учета конвекции, то в итоге окажется, что при конвекции возникает дополнительный подвод энергии в систему с боков за счет того, что входящие потоки нагреты сильнее, чем выходящие. Это и приводит к некоторому увеличению максимальной температуры, что хорошо видно из рисунка 3

В параграфе 1.3 рассматривается распределение параметров в вертикальном цилиндре и системе вертикальных коаксиальных цилиндров с постоянным энерговыделением.

В случае вертикального расположения цилиндра исчезает анизотропия по углу, а верхняя точка оказывается охлаждаемой. В системе коаксиальных цилиндров рассматривался двумерный вариант конвекции, то есть образование торов.

Сравнение с ранее рассмотренным вариантом (п.1.2) позволяет сделать предположение о том, что с увеличением энерговыделения и модифицированного числа Рэлея произойдет переход к трехмерной конвекции.

На рисунке 4 представлен типичный результат расчета для линий тока и изотерм. Как видно из рисунка, возникает два вихря, что связано с неоднородным профилем температуры. Максимальная температура практически не отличается от случая отсутствия конвекции. Этот результат легко объясним. Действительно, при движении снизу вверх в параллельном

потоке жидкость нагревается и охлаждается только за счет теплопроводности. Верхняя центральная точка, которая оказывается самой горячей при горизонтальной геометрии, в данном случае охлаждается, и температура в окрестности этой точки оказывается ниже максимальной.

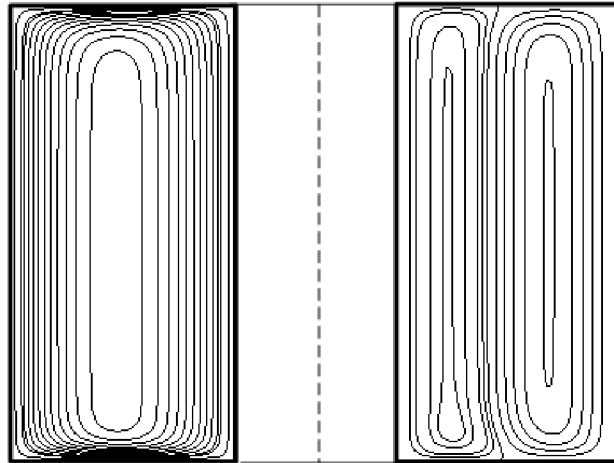


Рис. 4 – Изотермы и линии тока при вертикальном расположении системы коаксиальных цилиндров для $\sigma=2$, $Ra_T = 5 \cdot 10^3$.

Представлено вертикальное сечение системы коаксиальных цилиндров

Для цилиндра влияние конвекции может сказаться только при очень быстром проходе вертикальной части, но это возможно либо при высокой скорости потока, либо при условии, что высота цилиндра мала. Большую скорость конвекции можно получить, только увеличивая энергозатраты, что приводит к дальнейшему увеличению максимальной температуры. Условия, при которых начинает сказываться влияние конвекции при укорачивании цилиндра, могут быть легко проанализированы. Анализ показывает, что только при очень малых высотах можно получить значительное конвективное охлаждение, но такая геометрия несовместима с конструкцией лазера, поскольку длина активной зоны между зеркалами оказывается очень малой.

Приведенные в работе расчеты касались двумерной модели. Кроме того, достаточно просто учитывалось энерговыделение в системе. Однако даже простая модель позволяет выявить основные особенности конвективного течения в системе коаксиальных цилиндров. Увеличение Ra_T приводит к

изменению структуры конвективного течения, поэтому анализ конвективных потоков играет исключительно важную роль при расчете геометрии лазерной системы.

Во второй главе решена задача о тепловом взрыве в горизонтальном цилиндре и системе горизонтальных коаксиальных цилиндров при энергоподводе с учетом естественной конвекции. Рассматривалось как классическое решение Франк-Каменецкого, так и модель тепловыделения с учетом обратных эндотермических реакций

В параграфе 2.1 дан краткий обзор работ по теории теплового взрыва и обоснована постановка решаемой задачи.

В параграфе 2.2 изучался тепловой взрыв в горизонтальных цилиндре и системе коаксиальных цилиндров с учетом конвекции.

Сначала рассматривалось энерговыделение в форме, использованной Франк-Каменецким, то есть в виде $Q = Q_{0F} \exp(A_F \cdot T)$.

Уравнение без конвекции хорошо известно в теории теплового взрыва Франк-Каменецкого. Учет конвекции приводит к тому, что вместо одного уравнения Франк-Каменецкого $\Delta\varphi = -\exp(b_{WC}\varphi)$, где параметр Франк-Каменецкого b_{WC} определяется параметрами энерговыделения Q_{0F}, A_F , а также диаметром цилиндра и коэффициентом теплопроводности среды, появляется система трех уравнений. Они имеют вид системы (1-3), однако, в уравнении энергии вместо единицы стоит $\exp(b_C\varphi)$. Как и в теории Франк-Каменецкого, тепловой взрыв соответствует такому значению b_C , при котором решения, удовлетворяющего граничным условиям, не существует. Анализ системы уравнений позволяет найти критическое значение b_C^* , при котором происходит тепловой взрыв.

В случае коаксиальных цилиндров критический параметр b_C^* , соответствующий возникновению теплового взрыва, при не слишком больших

значениях геометрического параметра σ , практически не меняется при учете конвекции, то есть наличие конвекции слабо влияет на параметры, определяющие условия возникновения взрыва. Этот результат объясняется следующим образом. Жидкость, которая движется на стыке двух вихрей, охлаждается только за счет теплопроводности и, несмотря на наличие движения, максимальная температура в центре мало отличается от температуры, рассчитанной без учета конвекции.

Совершенно иная ситуация возникает в цилиндре. На рисунке 5 представлена зависимость параметра δ , определяемого как отношение критического параметра b_c с учетом конвекции к параметру b_{wc} без учета конвекции ($\delta = b_c/b_{wc}$) от модифицированного числа Релея Ra_T . Из рисунка 5 видно, что с увеличением Ra_T роль конвекции возрастает. Охлаждение системы улучшается и тепловой взрыв происходит гораздо позже.

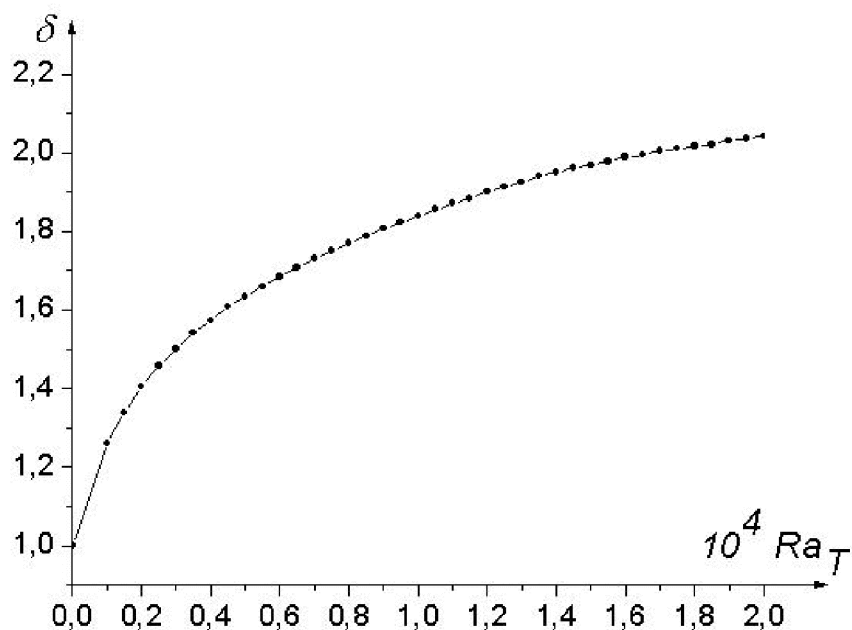


Рис. 5 – Зависимость параметра δ от модифицированного числа Релея Ra_T

Далее в параграфе 2.2 был произведен одновременный учет прямых и обратных реакций. Энерговыведение в простейшем случае описывается

соотношением $Q = Q_0 \exp(-A/T) \cdot (1 - \frac{kT}{T_0})$, где k – параметр, характеризующий

поглощение энергии при обратных эндотермических процессах.

Решение этой задачи представлено на рисунке 6 в виде зависимости параметра Франк-Каменецкого от максимальной температуры в рабочей области цилиндра для различных значений энергетических характеристик обратных процессов.

Из рисунка 6 видно, что учет обратных процессов заметно увеличивает критические значения параметров.

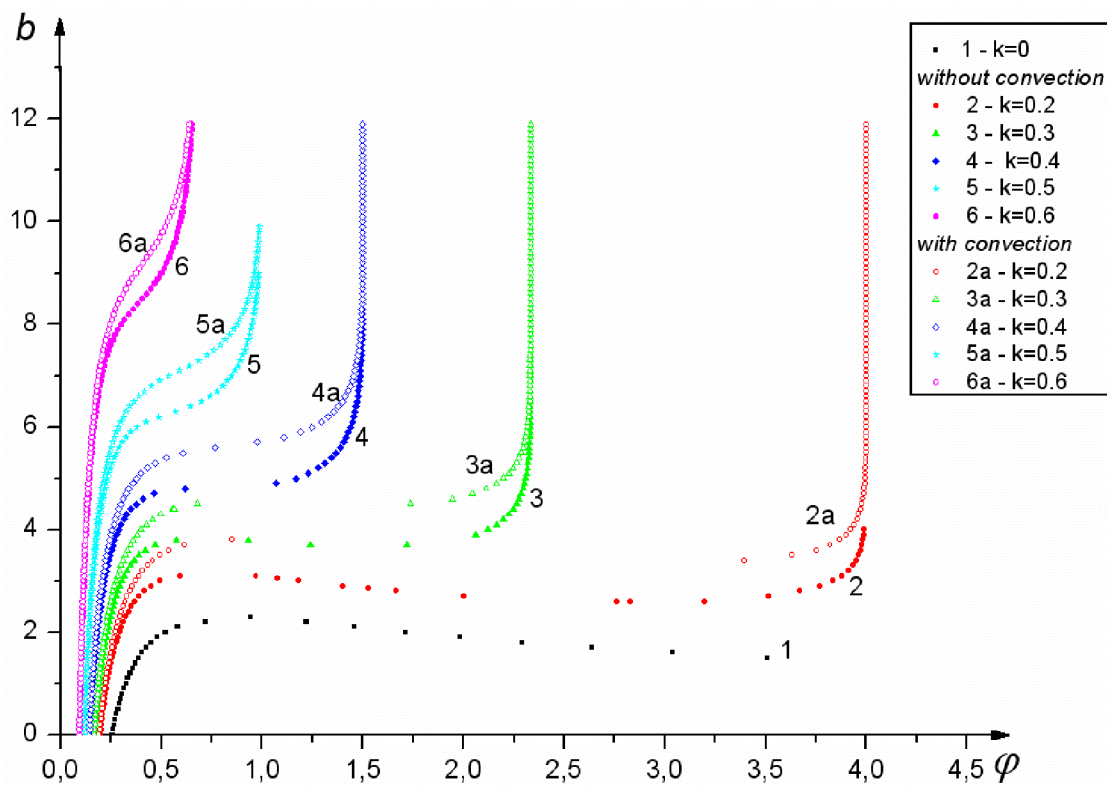


Рис.6 – Зависимость параметра Франк-Каменецкого от максимальной температуры в цилиндре при различных энергетических характеристиках обратных процессов

Влияние конвекции сказывается больше всего в области теплового взрыва, т.е. в районе первого максимума $b(\varphi)$. При низких и высоких температурах кривые на рисунке 6 практически совпадают. Хотя максимальное

изменение параметра b в области теплового взрыва составляет около 20%, эффект этого изменения оказывается значительным, поскольку множитель b стоит в экспоненте, $b\varphi \sim 10$, поэтому даже при небольшом изменении b происходит существенное изменение величины энерговклада.

В третьей главе рассматривается задача расчета параметров положительного столба тлеющего разряда с учетом уравнений гидродинамики. Разряд рассматривается в горизонтальном цилиндре вдоль оси этого цилиндра.

В параграфе 3.1 кратко обсуждаются особенности тлеющего разряда и обосновывается постановка решаемых задач.

Параграф 3.2 посвящен постановке задачи, построению математической модели и численному моделированию гидродинамических процессов в плазме газового разряда.

В параграфе 3.3 проводится анализ результатов. В цилиндре без учета конвекции тепло по механизму теплопроводности отводится к стенкам, которые имеют комнатную температуру. Температура газа равномерно спадает от оси к стенкам. Плотность потока тепла в стенку в этом случае равна $-\lambda(\partial T/\partial r)$. Но картина совершенно меняется, если учитывается конвекция. В таком случае уже нельзя рассматривать одномерную задачу. Профиль температуры существенно меняется.

На рисунке 7 представлено распределение температуры на оси цилиндра без учета и с учетом конвекции при разных значениях тока. Как видно из рисунка, в случае отсутствия конвекции температура имеет вид колокола, симметричного относительно центра, с максимумом в нем. С ростом тока температура растет, и колокол стягивается к центру – энерговыведение происходит в узком столбе, и, наконец, при некотором значении тока происходит контракция, стягивание столба в шнур.

В случае же с конвекцией максимум температуры смещается вверх цилиндра. При этом с ростом тока наблюдается также исчезновение симметрии

самого распределения. С ростом энерговклада, то есть с увеличением тока, конвекция снижает максимальную температуру газа по сравнению со случаем отсутствия конвекции.

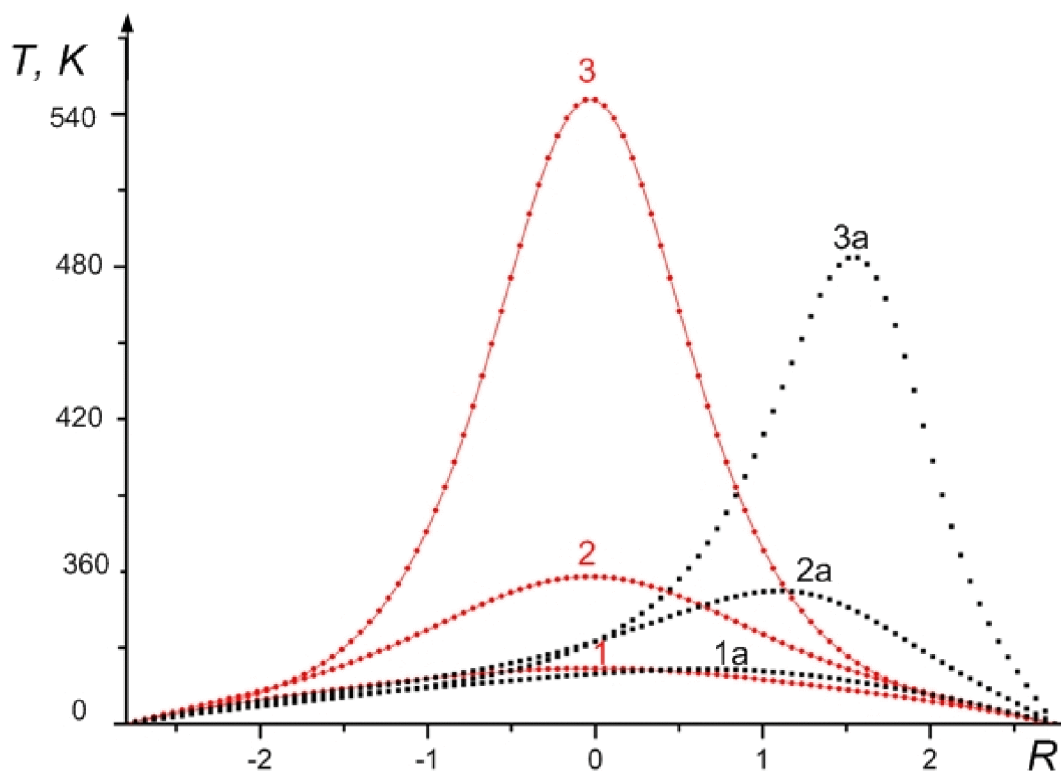


Рис. 7 – Распределение температуры на оси цилиндра без учета (сплошные кривые 1, 2, 3) и с учетом конвекции (пунктирные кривые 1а, 2а, 3а) при разных значениях тока 1 – 6 мА, 2 – 10 мА, 3 – 17 мА, $p=75$ Тор.

На рисунке 8 показаны относительные радиальные распределения плотности электронов.

Из рисунка 8 видно, что с ростом тока токовый канал, который характеризуется профилем плотности числа электронов N_e , резко сжимается. Полуширина шнура изменяется с 64% до 14% от диаметра трубки. В тоже время расчет при наличии конвекции приводит к изменению не только формы,

но и местоположения максимума кривой. Полуширина при этом меняется с 64 % до 5% от диаметра трубки.

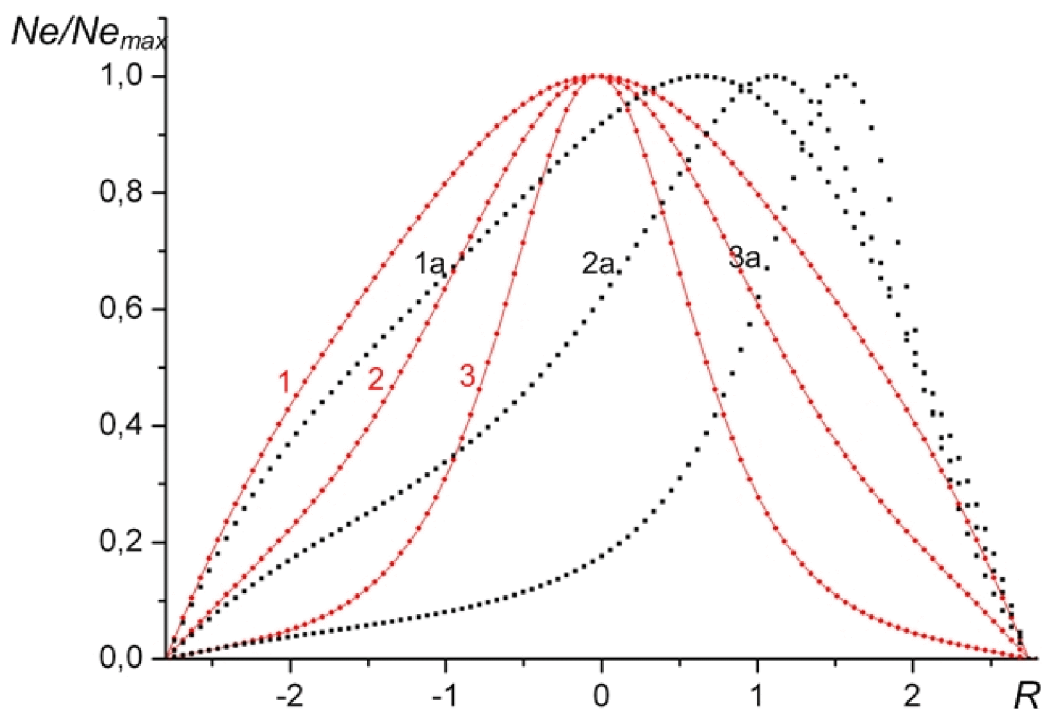


Рис. 8 – Относительные радиальные распределения плотности электронов $N_e/N_{e\max}$ без учета (сплошные кривые 1, 2, 3) и с учетом конвекции (пунктирные кривые 1а, 2а, 3а) при разных значениях тока 1 – 6 мА, 2 – 10 мА, 3 – 17 мА, $p=75$ Тор.

Установлено, что процессы конвекции, то есть гидродинамического переноса, существенны как для теплопроводности, так и для амбиполярной диффузии. В точках максимальной скорости конвекция эффективней молекулярного переноса в 30-40 раз:

$$\frac{v \cdot \text{grad}\varphi}{\chi \cdot \Delta\varphi} = 30, \quad \frac{v \cdot \text{grad}N_e}{D_a \cdot \Delta N_e} = 40.$$

где D_a - коэффициент амбиполярной диффузии.

Как известно, числа Рэлея зависят от давления (плотности) и разности температур. Отсюда следует, что существует некоторая область влияния конвекции. На рисунке 9 представлена зависимость электрического поля E от разрядного тока I в неоне без учета и с учетом конвекции для различных давлений, а также кривая, отделяющая две области. Область I – область, в которой конвекция не играет роли. Область II – область, где конвекция играет существенную роль, изменяя параметры разряда.

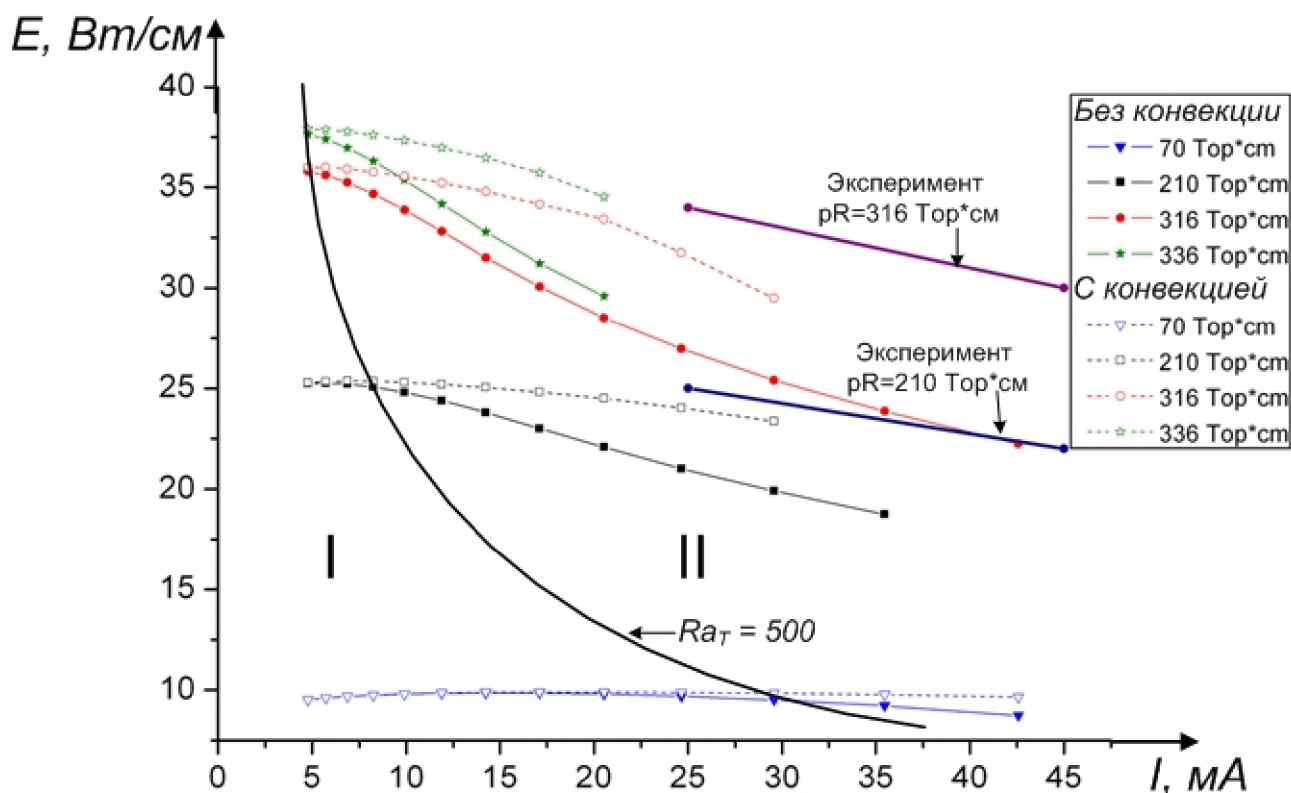


Рис. 9 – Зависимость электрического поля E от разрядного тока I в неоне без учета и с учетом конвекции для различных давлений.

Экспериментальные данные из работы Голубовский Ю. Б., Зинченко А. К., Каган Ю. М., - ЖТФ, 1977, т. 47, с. 1478. Область I – влияние конвекции сказывается слабо, область II – влиянием конвекции пренебречь нельзя. Кривая, разделяющая области, соответствует $Ra_T \approx 500$.

Данная кривая показывает, что число Рэлея очень точно определяет параметры задачи, поскольку примерно соответствует величине $Ra_T \approx 500$.

Расчетные кривые, выполненные с учетом и без учета конвекции, начинают разделяться. Можно наблюдать, что при невысоком давлении (25 Тор) конвекция начинает влиять только при больших значениях тока. Это объясняется сильным влиянием диффузии. В то же время, при давлениях порядка 100 Тор конвекция начинает оказывать влияние при небольших токах.

Из рисунка 9 также видно, что с увеличением тока влияние конвекции растет, и поэтому невозможно точное моделирование задачи без учета конвекции.

В настоящее время существует целый ряд работ, где данные кривые моделируются с точностью до нескольких процентов (см. например, Petrov G.M., Ferreira C.M. Phys. Rev., 1999, E 59, p. 3571), однако теплоотвод и диффузия учитываются с помощью простейших моделей. Анализ, проведенный в данной работе, показывает, что такие расчеты дают только порядки величин. Хотя сам процесс контракции разряда связан с зависимостью ионизации от концентрации электронов, однако форма вольт-амперных характеристик в области повышенных давлений существенно меняется за счет конвекции.

Основная цель данной работы состояла в том, чтобы показать, что учет газодинамических процессов (причем строгий учет!) необходим. Отметим, что режимы контракции, гистерезис и другие явления протекают в условиях существенного влияния конвекции.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель, описывающая двумерную конвекцию в системе горизонтальных и вертикальных коаксиальных цилиндров при объемном энерговыделении. Разработан алгоритм и реализована программа расчета гидродинамических параметров среды.

2. Проведено численное моделирование параметров газодинамической среды в системе горизонтальных коаксиальных цилиндров. Впервые определена критическая поверхность $Ra_T(Ra, \sigma)$, отделяющая разные режимы конвекции, которая обобщает ранее известные результаты при $Ra_T = 0$. Показано, что в исследуемом диапазоне чисел Рэлея в зависимости от параметров задачи реализуется два варианта двумерных течений – одно- и двухвихревые.

3. Рассмотрена конвекция в горизонтальном цилиндре с постоянным энерговыделением и проведено сравнение значений максимально достижимых температур для цилиндра и системы коаксиальных цилиндров при горизонтальном расположении. Показано, что увеличение энерговыклада приводит в случае простой цилиндрической геометрии к уменьшению максимальной температуры по сравнению со случаем отсутствия конвекции, в то время как в системе коаксиальных цилиндров при небольших радиусах внутреннего цилиндра конвекция приводит к увеличению максимальной температуры.

4. Рассмотрена конвекция в вертикальном цилиндре и в системе коаксиальных цилиндров при вертикальном расположении с постоянным энерговыделением. Показано, что только при очень малых высотах цилиндра можно получить конвективное охлаждение, однако такая геометрия несовместима с конструкцией лазера, поскольку длина активной зоны между зеркалами оказывается очень малой. Установлено, что учет конвекции

приводит к незначительному снижению температуры в цилиндре, по сравнению со случаем отсутствия конвекции. Хотя, начиная с удвоенного отношения длины цилиндров к его диаметру, максимальные температуры в одной и другой системе будут практически одинаковыми.

5. Построена математическая модель теплового взрыва в горизонтальном цилиндре и системе коаксиальных цилиндров при объемном энерговыведении и реализована программа расчета гидродинамических параметров среды. Решена задача о тепловом взрыве с учетом естественной конвекции и обратных эндотермических реакций. Показано, что для случая коаксиальных цилиндров наличие конвекции не влияет на параметры возникновения взрыва.

Показано, что для горизонтального цилиндра конвекция особенно сильно влияет на параметры системы именно в области теплового взрыва, что указывает на необходимость учета конвективного теплоотвода при любых расчетах газовых лазеров и разрядов.

6. Впервые проведено строгое решение задач расчета параметров положительного столба тлеющего разряда с учетом гидродинамического движения (уравнений газодинамики). Показано, что конвекция существенно меняет свойства разряда вблизи зоны контракции.

В результате исследований показано, что уточненные модели, учитывающие достаточно сложные кинетические схемы, но использующие упрощенный анализ теплопроводности и диффузии, не принимающие во внимание конвекцию, следует признать достаточно грубыми, а привязанные к эксперименту константы необходимо корректировать с учетом конвективных процессов.

4 ПУБЛИКАЦИИ

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Roschina (Sakharova) N.A., Uvarov A.V., Osipov A.I. Natural convection in an annulus between coaxial horizontal cylinders with internal heat generation // Int. J. of Heat Mass Transfer. 2005, v. 48, p. 4518-4525

2. Осипов А.И., Уваров А.В., Винниченко Н.А., Рощина (Сахарова) Н.А. Нелинейные задачи гидродинамики: вихревые структуры в неравновесном газе // Нелинейный мир, № 1-2, т.3, 2005. с. 40-47

3. Osipov A.I., Uvarov A.V., Roschina (Sakharova) N.A. Influence of natural convection on the parameters of thermal explosion in the horizontal cylinder // Int. J. of Heat Mass Transfer, 2007, v. 50, p. 5226–5231

4. Osipov A.I., Uvarov A.V., Vinnichenko N.A., Roschina (Sakharova) N.A. Vortex structures in a non-equilibrium gas // Minsk International Colloquium on Physics of shock waves, combustion, detonation and non equilibrium processes, MIC 2005, Minsk p. 139-140

5. Рощина (Сахарова) Н.А. Свободная конвекция в полости между горизонтальными коаксиальными цилиндрами при объемном энерговыделении // Международная конференция студентов и аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов - 2004», секция Физика, с 176

6. Осипов А.И., Уваров А.В., Рощина (Сахарова) Н.А. Влияние свободной конвекции на теплоотвод в газовых лазерах // XI Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ. Материалы докладов и сообщений. Т.II Санкт-Петербург, Россия 2005, с. 52

7. Мукин Р.В., Осипов А.И., Рощина (Сахарова) Н.А., Уваров А.В. Гидродинамическая устойчивость в неравновесных газовых системах с энерговыделением при разных способах теплоотвода // IX Всероссийский съезд

по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. II Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006, с. 135

8. Рощина (Сахарова) Н.А., Уваров А.В.. Влияние естественной конвекции на возникновение теплового взрыва в неравновесной газовой среде // Необратимые процессы в природе и технике: Труды 4 всероссийской конференции 29-31 января 2007г. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, ФИАН 2007, с. 234-237