

На правах рукописи

ЧЭНЬ ЮФОН

**Некоторые задачи исследования потоков монодисперсных
микросфер при их генерации в осложненных условиях**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Handwritten signatures and initials, including the author's name ЧЭНЬ ЮФОН.

Москва - 2001



Работа выполнена в Московском энергетическом институте (техническом университете) на кафедре низких температур

Официальные оппоненты:

Афанасьев В.Н.

- доктор технических наук, профессор

Синкевич О.А.

- доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущее предприятие: Государственный НИИ прикладной механики и электродинамики Московского государственного авиационного института

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

___ часов на
энергетическом

ные печатью

вет МЭИ

Тип. МЭИ. Зак. 5346

Тир. 500000

Мика В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Создание многих перспективных технологий основано на использовании вещества в монодисперсном состоянии, которое представляет собой сложную термогидродинамическую и физико-химическую систему, обладающую рядом особых свойств. Изучение монодисперсных систем к настоящему времени оформилось в виде самостоятельного научного направления - физики и техники монодисперсных систем. Это направление занимается исследованиями генерации, распространения, взаимодействия с внешними полями и средами идентичных по ряду параметров (массе, размеру, электрическому заряду и т.д.) субмиллиметровых сферических частиц (капель, гранул) из различных материалов. Технологии на основе монодисперсных систем получили название монодисперсных. Более ранние исследования (Блаженков, Клименко, Дмитриев, Коротеев, Афанасьев, Сулов, Ентов, Ярин, Шадов, Ормз, Чаухари, Боджи и др.) выявили ряд интересных закономерностей в поведении таких систем. Вместе с тем указанные исследования продемонстрировали необходимость обобщения некоторых важных результатов и развития новых методов изучения генерации и распространения капельных монодисперсных потоков. При генерации потоков монодисперсных капель в осложненных условиях (внешняя окислительная атмосфера, наличие акустических и тепловых полей, появляются вопросы об идентичности капель в когерентной структуре, стабильности скоростей их движения, расстояний между отдельными микросферами в когерентной структуре и т.п). Таким образом, возникает необходимость исследовать влияние разнообразных факторов на процессы генерации капель, в частности, с внутренней полостью, заполненной газом. В этом состоит актуальность исследований влияния различных эффектов на линейную и нелинейную эволюцию струй, характерные времена образования капель, длину нераспавшейся части струи, начальные скорости капельных потоков, степени монодисперсности по размерам, скоростям, угловым отклонениям и т.д. Важными являются также эффекты влияния электрического заряда на колебательные свойства полых микросфер, заполненных газом. Именно этим задачам посвящена настоящая работа.

Наконец, прикладные направления и технологии, рассмотренные в настоящей диссертационной работе, чрезвычайно актуальны по целому ряду причин, которые изложены ниже.

Среди многообразных приложений физики и техники монодисперсных систем особое место занимают технологии, в основе которых лежат процессы генерации и

распространения монодисперсных потоков микросфер. Подобным технологиям в настоящем исследовании уделено особое внимание, причем рассмотрены подробно две из них - космические капельные радиационные теплообменники (капельные холодильники-излучатели) и системам генерации криогенных корпускулярных мишеней для ускорительной техники. Первая из указанных технологий является одним из вариантов решения важнейшей для космической техники задачи - отвода избыточного тепла от космических аппаратов при работе энергодвигательной установки. Сегодня подобная технология рассматривается как наиболее перспективная для использования ее в качестве систем отвода тепла при мощности теплоотвода, превышающей 100 кВт. Кроме того, такая система является метеоритнонеуязвимой, что делает ее актуальной при больших временах функционирования космических систем. Кроме того, при разработке подобной системы на основе монодисперсных капельных потоков, появляются возможности решения и других задач космических технологий. Вторая из указанных выше технологий важна для задач ускорительной физики и физики высоких энергий. Создание корпускулярных сферических криогенных мишеней, например, на основе водорода, открывает широкие перспективы исследования новых задач взаимодействия мощных протонных и электронных пучков с веществом и позволяет разработать новые виды детекторов для изучения продуктов реакций при подобных взаимодействиях. Несмотря на то, что основной материал настоящей работы посвящен именно этим технологиям, многие полученные в исследовании результаты применимы к широкому спектру других монодисперсных технологий, поскольку во всех из них вопросы генерации и распространения капельных монодисперсных потоков являются основными. Во всех указанных технологиях весьма перспективным считается использование полых микросфер, что делает актуальность настоящего исследования актуальным.

Цель и задачи исследования.

Основной целью настоящей работы является дальнейшее развитие нового научного направления - физики и техники монодисперсных систем. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Исследован процесс диффузионного переноса окислителя на цепочку капель жидкого металла;
- Поставлена и решена задача об окислении поверхности капель жидкого металла вплоть до двумерного фазового перехода в поверхностном слое за счет возникновения микрослоя окисленного металла;
- Поставлена и решена задача о колебаниях жидкометаллических капель с учетом релаксации поверхностного натяжения за счет поверхностного окисления;

- Поставлена и решена задача о колебаниях микросферических жидких оболочек, заполненных газом; найден спектр колебаний с учетом сжимаемости газа, определен характер звуковых колебаний при пульсациях микросфер, заполненных газом; найдены декременты колебаний подобных оболочек; предсказан эффект коллективного поведения жидких микросферических оболочек, заполненных газом;
- Поставлена и решена задача о колебаниях микросферических электрически заряженных оболочек, заполненных газом; найдены спектры колебаний подобных оболочек с учетом вариации поверхностного электрического заряда и толщины оболочек.

Научная новизна.

В диссертационной работе сформулированы новые задачи о поведении монодисперсных капель различных жидкостей в осложненных внешних условиях. Проведен анализ колебаний капель жидкого металла при генерации последних методом вынужденного капиллярного распада струй в условиях окисления. Проведен численный анализ развития диффузионного пограничного слоя вблизи цепочки жидкометаллических капель, исследованы модели окисления поверхности жидкого металла в каплях на базе уравнения двумерного фазового перехода. Показано, что этот эффект может приводить к падению эффективного поверхностного натяжения поверхности жидкого металла, что в свою очередь ведет к стабилизации колебаний капель и образованию на очень малых временах «застывшей» формы жидкометаллических капель.

Изучены задачи колебаний полых микросфер, заполненных газом. Построены основные уравнения, описывающие процесс колебаний полых микросфер с газом, найдены спектры колебаний полых микросфер в зависимости от толщины оболочки, внешнего диаметра и других параметров. Рассчитаны декременты (затухание) колебаний за счет влияния газа на процесс колебаний. Сделаны оценки влияния вязкости на процесс затухания колебаний.

Проведено исследование колебаний полых электрически заряженных микросфер, заполненных газом. Получены уравнения для описания подобных колебаний, найдены спектры колебаний полых заряженных капель, определены основные параметры, влияющие на колебательные процессы в полых заряженных каплях. Выявлено влияние величины поверхностного электрического заряда на спектры колебаний капель.

Практическая ценность.

Диссертационная работа имеет практическую ценность для ряда фундаментальных и прикладных исследований в области монодисперсных технологий.

Разработанные теоретические модели позволяют использовать на практике некоторые результаты для проектирования новых систем генерации монодисперсных микросфер. В частности, решение задач о поведении окисляющихся жидкометаллических капель позволяет предсказать форму металлической микросферы и степень ее несферичности, что важно для ряда технологических условий использования монодисперсных металлических микросфер (криогенная техника, медицинское приборостроение, космические технологии и т.п.). Решение задач о поведении полых жидких оболочек, заполненных газом, позволяет предсказать важный для практики эффект генерации и затухание акустических волн, связанных с особенностью поведения звука внутри полых жидких микросфер. Наличие слабозатухающего звукового поля позволяет предсказать возможность интересных с практической точки зрения коллективных звуковых эффектов системе полых жидких микросфер, а также предсказать возможность создания усиливающей (активной) звуковой среды, способной генерировать когерентное звуковое поле. Исследование задач о колебаниях полых электрически заряженных микросфер позволяет предсказать и изучить важные с практической точки зрения эффекты, сопровождающие разработку специфических монодисперсных технологий (полые заряженные управляемые электрическим полем жидкие и твердые оболочки различных материалов для термоядерных применений, электрокапелеструйная технологии печати полыми каплями чернил и красок, системы сжигания топлива в форме оболочек и т.д). Криомонодисперсные технологии имеют важное практическое значение для производства редких материалов с уникальными свойствами (керамические гранулы, гранулированное топливо, специальные монодисперсные порошки для оптоэлектроники и т.п.).

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Третья международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2000), Истра-Москва 2000г., Европейская аэрозольная конференция, Оксфорд, Англия, 2001г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 4 работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка литературы. Работа содержит 113 страниц машинописного текста, в том числе 48 рисунков, 3 таблиц, библиография насчитывает 146 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы исследований, изложены основные цели работы, поставлены основные задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность проведенных исследований.

В главе 1 дан обзор современного состояния физики и техники монодисперсных систем и технологий. Проведен анализ современного состояния исследований в области генерации субмиллиметровых микросфер из различных материалов на основе метода ВКРС жидкостей. Представлены основные достижения по изучению капиллярного распада струй и получению монодисперсных капель и гранул в различных условиях. Рассмотрены основные закономерности генерации капель при наложении возмущений различного типа на струю, проведен анализ динамики образования сателлитов и нелинейного роста гармоник на поверхности струи, описаны основные особенности капиллярного распада жидкометаллических, заряженных и испаряющихся струй, представлены данные о поведении капельных потоков в различных условиях. Представлен обзор существующих и перспективных монодисперсных систем и технологий, базирующихся на методе ВКРС. Поставлены основные задачи исследований.

Глава 2 посвящена изучению процессов колебаний жидкометаллических капель в окислительной атмосфере. Для определения поверхностной концентрации кислорода на поверхности капель решается численно задача о диффузионной пограничном слое. При проведении расчетов были использованы следующие допущения: газ движется попутно капельному потоку, поэтому граничные условия для движения газа должны быть поставлены в начале капельного потока; на входе в расчетную область концентрация молекул кислорода равномерна по сечению газового потока; все молекулы кислорода, достигающие поверхность капель вступают в химическую реакцию с молекулами металла. Последнее допущение справедливо для начального участка движения капель, когда поверхностная концентрация окисла достаточно мала. Поток молекул кислорода из охлаждающего газа зависит от гидродинамики обтекания цепочки капель, если капли движутся одна за другой или от обтекания одной капли, если капли движутся независимо друг от друга. Для второго случая в литературе имеются данные о нахождении потока массы на поверхность сферы, например, с использованием безразмерных зависимостей вида:

$$Sh = 2 + 0.03 Re^{0.54} Sc^{0.33} + 0.35 Re^{0.58} Sc^{0.356} \quad (1)$$

где $Sh = \frac{\beta \cdot d}{D}$ - число Шервуда, β - коэффициент массоотдачи, d - диаметр сферы, D - коэффициент диффузии, $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ - число Рейнольдса, v - скорость газа относительно

капли, ν - кинематическая вязкость, $Sc = \frac{\nu}{D}$ - число Шмидта.

В том случае, когда капли движутся одна за другой, коэффициент массоотдачи (или поток молекул кислорода на поверхность капель) зависит от гидродинамических параметров всего потока газа, обтекающего цепочку капель и от конфигурации диффузионного и гидродинамического пограничных слоев. Следовательно, для корректного определения потока молекул кислорода на поверхность капель в цепочке необходимо определить профили скорости и концентрации кислорода в газе, окружающем движущуюся цепочку капель.

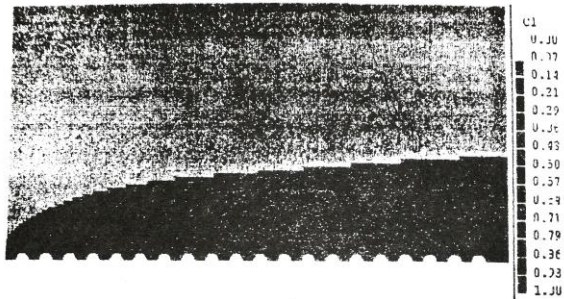


Рис.1

Расчеты выполнены с использованием вычислительного комплекса PHOENICS для двумерной геометрии в полярных координатах. Размеры расчетной области составляют 4 мм в радиальном направлении и 8.4 мм в продольном направлении. Сетка в радиальном направлении выбиралась неравномерной, число контрольных объемов по радиальной координате равно 81, а по продольной координате - 840. Данные параметры сетки были использованы для проведения расчетов концентрации кислорода в газе, движущемся около 20 монодисперсных капель.

В качестве примера на рис.1 приведено, полученное численно, распределение концентрации кислорода при относительной скорости газа $\nu = 0.1$ м/с.

На рис.2 приведены результаты расчета зависимости коэффициента массоотдачи от номера капли при обтекании 20 капель диаметром 200 мкм при различных относительных скоростях газа. Коэффициент массоотдачи рассчитывался егированием по поверхности каждой капли потока молекул кислорода с использованием следующего соотношения:

$$\beta = \frac{D}{C_w} \frac{\partial C}{\partial n} \quad (2)$$

где C_w - концентрация молекул кислорода на входе в расчетную область и на ее боковой границе; n - нормаль к поверхности капли.

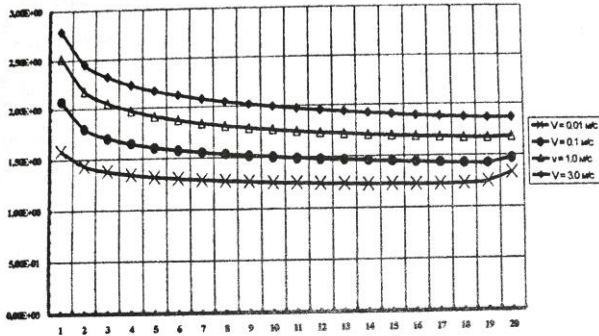


Рис.2

Анализ приведенных данных показывает, что при малых значениях относительных скоростей газа существует незначительное увеличение коэффициента массоотдачи около конца расчетной области. Это связано с ограниченным количеством капель в данной расчетной области. Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы: коэффициент массоотдачи уменьшается по длине капельного потока, это связано с ростом диффузионного пограничного слоя; изменение коэффициента массоотдачи происходит достаточно медленно; значение коэффициента массоотдачи увеличивается с ростом скорости газа, а относительное его изменение уменьшается.

Изменение количества молекул окисла на поверхности капли связано с коэффициентом массоотдачи следующим соотношением:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \beta(t) \cdot b \cdot C_s (1 - C_s) \quad (3)$$

где C_v - объемная концентрация молекул кислорода в окружающем газе, связанная с относительной концентрацией соотношением $C_v = \rho N_A / M$, здесь ρ - плотность газа, N_A - число Авогадро, M - масса моля. В правой части уравнения (3) первое слагаемое связано с потоком молекул на поверхность капли из окружающего газа и приводит к росту поверхностной концентрации окисла, а второе - с отражением молекул кислорода от окисленной поверхности и приводит к ограничению роста молекул окисла на поверхности. Зависимость коэффициента массоотдачи от времени связана с изменением потока молекул кислорода в упорядоченной цепочке капель и определяется полученной зависимостью коэффициента массоотдачи от номера капли в цепочке.

Наличие окисла на поверхности металла даже при относительно малой его концентрации существенным образом оказывает влияние на величину поверхностного натяжения. В этом случае процесс окисления на свободной поверхности подобен процессу адсорбции поверхностно-активного вещества, для которого коэффициент поверхностного натяжения связан с поверхностной концентрацией окисла и может быть описан посредством двумерной модели Фрумкина-Фольмера:

$$\left(\sigma_0 - \sigma + \frac{a}{A^2} \right) \cdot (A - b) = kT \quad (4)$$

где σ_0 и σ - поверхностное натяжение чистой жидкости и жидкости с окислом соответственно; A - площадь поверхностного слоя, приходящаяся на одну молекулу окисла; b - площадь молекулы окисла; a - константа (аналог константы Ван дер Ваальса).

Система уравнений для амплитуд колебаний поверхности капли записывается в виде:

$$\frac{dA_{ml}}{dt} = -\frac{\sigma(C_s)}{\rho R_0^3} l(l-1)(l+2) \cdot B_{ml}(t) - \frac{v_{eff} A_{ml}}{R_0^2} \quad (5)$$

$$\frac{dB_{ml}}{dt} = A_{ml}(t) \quad (6)$$

Начальные условия для системы уравнений (5)-(6) определяются условиями образования капель и представляют собой набор значений для всех гармоник, которые возникают при отрыве капли. Уравнения (5)-(6) дополняются соотношениями для

изменения поверхностной концентрации окисла (3) и изменения поверхностного натяжения в зависимости от поверхностной концентрации окисла:

$$\sigma(C_s) = \sigma_0 \left[1 + \frac{a}{b^2 \sigma_0} C_s^2 - \frac{kT}{b \sigma_0} \left(\frac{C_s}{1 - C_s} \right) \right] \quad (7)$$

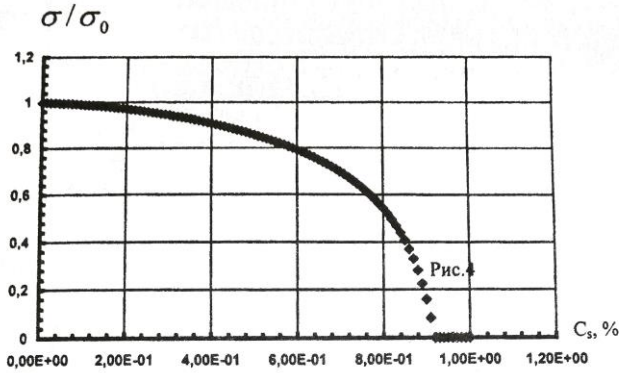


Рис.3

На рис.3 показана рассчитанная зависимость относительного поверхностного натяжения жидкого галлия. На рис. 4 - 5 представлены результаты расчета системы уравнений (1)-(7) для определения значения поверхностной концентрации окисла и амплитуды колебаний капель галлия, движущиеся в охлаждающем воздухе с концентрацией кислорода 0,2% (рис.4) и 0,1% (рис.5). Представленные результаты соответствуют колебаниям второй гармоники ($l = 2$) с начальной амплитудой $\delta_0 = 0.01$ и скорости относительного движения газа равной 3 м/с. При проведении расчетов учтено, что в тот момент времени, когда поверхностное натяжение становится очень малым (обращается в ноль) на поверхности происходит образование сплошной пленки окисла, эффективная вязкость резко возрастает, поверхность капли больше деформироваться не может и капля будет сохранять ту форму, которую приобрела к этому моменту времени.

В главе 3 представлены результаты исследования колебаний жидкой сферической оболочки, заполненной газом. Рассматривается полая исходно сферическая оболочка с внутренним и внешним радиусами соответственно R_1, R_2 и

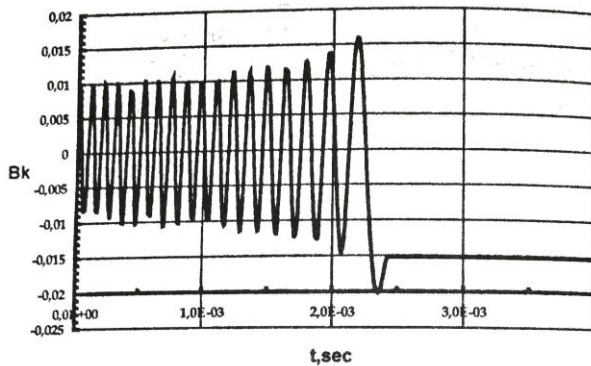


Рис.4

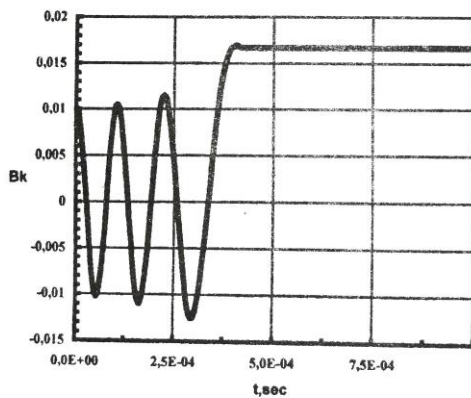


Рис.5

толщиной δ . Считается, что колебания внутренней и внешней поверхностей связаны между собой и имеют малую амплитуду, такую, что справедливо использование линейного приближения для определения частоты колебаний системы. Считая жидкость идеальной, ограничимся возможными потенциальными движениями в ней.

Введя потенциалы скорости в жидкой и в газовых фазах ($\Phi_{лг}, \Phi_1, \Phi_2$), считая жидкость несжимаемой, запишем систему уравнений для потенциалов в каждой из фаз в сферической системе координат

$$\frac{\partial^2 \Phi_i}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \Delta \Phi_i, \quad i=1, 2 \quad (8)$$

$$\Delta \Phi_{лг} = 0, \quad (9)$$

где

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

- оператор Лапласа.

На свободных поверхностях должны быть заданы условия сопряжения. На поверхности, разделяющей внутреннюю газовую полость (I) и жидкую оболочку (II) имеем ($r = R_1$):

а) кинематическое

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial t} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial r} \quad (10)$$

где $\xi_1 = \xi_1(t, \theta, \varphi)$ - деформация поверхности, текущее значение внешнего радиуса определяется как $R_1(t, \theta, \varphi) = R_1 + \xi_1(t, \theta, \varphi)$, здесь $\Phi_{лг} = \Phi_{лг}(t, R_1, \theta, \varphi)$;

б) динамическое

$$\rho_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\sigma}{R_1^2} \left\{ 2\xi_1 + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial \xi_1}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial \varphi^2} \right\} = \rho_{лг} \frac{\partial \Phi_{лг}}{\partial t} \quad (11)$$

в) непрерывности нормальной составляющей скорости

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_{лг}}{\partial r} \quad (12)$$

а на поверхности, разделяющей жидкую оболочку (II) и внешнее пространство, заполненное газом (III) ($r = R_2$) условия:

а) кинематическое

$$\frac{\partial \xi_2}{\partial t} = \frac{\partial \Phi_{1q}}{\partial r} \quad (13)$$

где $\xi_2 = \xi_2(t, \theta, \varphi)$, а текущее значение внешнего радиуса определяется как $R_2(t, \theta, \varphi) = R_2 + \xi_2(t, \theta, \varphi)$, $\Phi_{1q} = \Phi_{1q}(t, R_2, \theta, \varphi)$

б) динамическое

$$\rho_{1q} \frac{\partial \Phi_{1q}}{\partial t} - \frac{\sigma}{R_2^2} \left\{ 2\xi_2 + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial \xi_2}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial \varphi^2} \right\} = \rho_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial t}, \quad (14)$$

где $\Phi_2 = \Phi_2(t, R_2, \theta, \varphi)$

в) условие непрерывности нормальной составляющей скорости

$$\frac{\partial \Phi_{1q}}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial r}. \quad (15)$$

Очевидно, что во внутренней газовой области (I) при $r \rightarrow 0$ должно выполняться условие ограниченности решения в виде $\partial \Phi_1 / \partial r = 0$ при $r \rightarrow 0$, а во внешней газовой области (III) при $r \rightarrow \infty$ будем считать, что колебания сферы создают только расходящиеся сферические волны.

На основе решения задачи получено дисперсионное соотношение, позволяющее определить характер звуковых полей внутри и вне полый микросферы, заполненной газом (коэффициенты соответственно выписаны в диссертационной работе):

$$A_1(R_1, R_2, k) \omega^4 + \frac{\sigma}{\rho_{1q}} (1-l)(1+l) B_1(R_1, R_2, k) \omega^2 + C(R_1, R_2) \frac{\sigma}{\rho_{1q}} l(1+l)(1-l)^2(2+l)^2 = 0 \quad (16)$$

Соотношение (16) представляет собой уравнение относительно круговой частоты колебаний ω , решение которого дает представление о спектре колебаний сферы с газом внутри. В случае, когда газа внутри нет ($\rho_1 = 0$) анализ дисперсионного

соотношения показывает, что нулевая гармоника ($l = 0$) неустойчива, т. е. возникает движение жидкости, приводящее к схлопыванию пустой сферической полости.

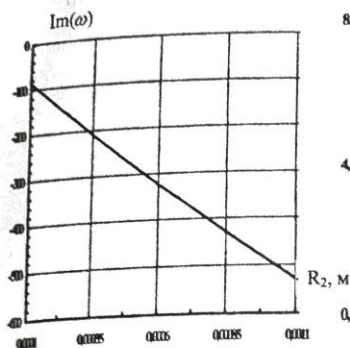


Рис.6

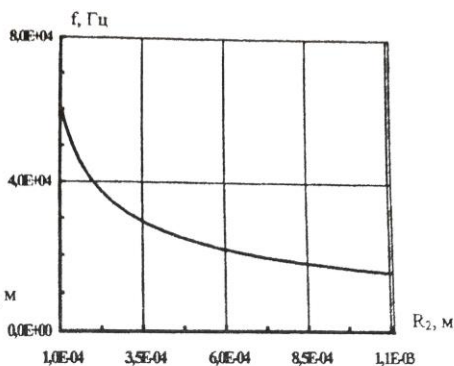


Рис.7

На рис. 6 - 7 в качестве примера приведены результаты расчета сферических деформаций нулевой гармоники ($l = 0$) для оболочек воды толщиной 10 мкм в присутствии воздуха при атмосферном давлении.

Результаты расчета показывают, что с ростом размеров сферы частота колебаний уменьшается и увеличивается скорость затухания колебаний, о чем свидетельствует уменьшение мнимой части решения дисперсного соотношения. С ростом толщины оболочки частота колебаний несколько уменьшается, но значительно сокращается скорость затухания колебаний. Так, для оболочек с внутренним радиусом 200 мкм и толщиной оболочки $\delta = 100$ мкм частота колебаний составляет величину $f \approx 22$ кГц, а время затухания колебаний $\tau \approx 0,16$ с.

На рис.8 представлены результаты расчета зависимости частоты колебаний оболочки толщиной $\delta = 10$ мкм от ее радиуса при $l = 2$. Результаты расчета показывают, что для второй гармоники затухания колебаний очень слабое (при $\delta = 10$ мкм $\text{Im}(\omega) \approx -9$, при $\delta = 100$ мкм $\text{Im}(\omega) \approx -0,18$). Оценка декремента вязкого затухания колебаний показывает, что для второй гармоники оно больше, чем уменьшение амплитуды колебаний за счет испускания звука. Величина декремента колебаний уменьшается с ростом радиуса оболочки и лежит в интервале от 2 до 25 сек⁻¹. Кроме

того, с ростом толщины оболочки частота колебаний достаточно быстро уменьшается до значения, соответствующего частоте колебаний пузыря в большом объеме жидкости. При увеличении радиуса сферы и постоянной толщине оболочки частота колебаний тоже уменьшается.

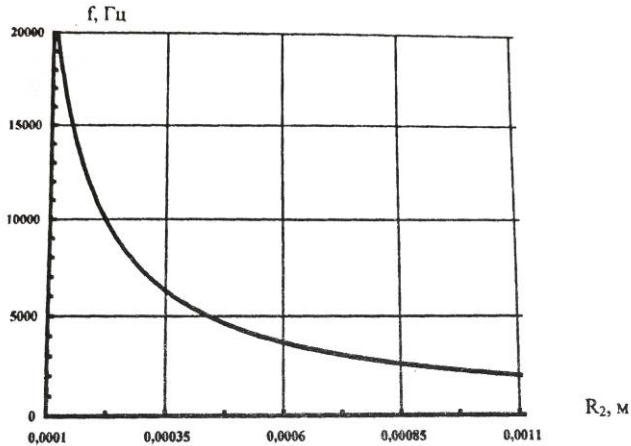


Рис. 8

Глава 4 посвящена изучению колебаний полых микросферических электрически заряженных оболочек, заполненных газом. Целью настоящего раздела является определение зависимости размеров жидкой микрокапсулы с газовой полостью внутри от величины нанесенного на поверхность заряда и ее спектра колебаний.

Для определения размеров жидкой микрокапсулы необходимо выполнение баланса нормальных напряжений в жидкости и условия сохранения массы. Поэтому, считая, что при отсутствии заряда микрокапсула имеет внутренний радиус R_0 и внешний радиус R_{20} можно представить систему уравнений, описывающую равновесное состояние жидкой микрогранулы:

$$P_{in} = P_{out} + 2 \cdot \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{\epsilon_0 E_r^2(R_2)}{2} \quad (17)$$

$$\frac{4}{3} \pi (R_2^3 - R_1^3) = \frac{4}{3} \pi (R_{20}^3 - R_{10}^3) \quad (18)$$

$$P_m \cdot R_1^3 = R_{10}^3 \left(P_{out0} + 2 \cdot \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right) \quad (19)$$

Здесь R_1, R_2 - внутренний и внешний радиусы соответственно, P_m, P_{out} - внутреннее и

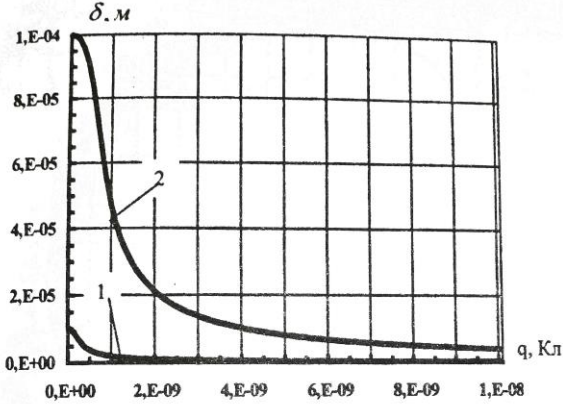


Рис.9

внешнее давление соответственно. Уравнение (17) представляет собой баланс напряжений в системе, уравнение (18) - закон сохранения массы при изменении размеров, а уравнение (19) получено с помощью уравнения состояния для идеального газа в предположении, что деформации, приводящие к изменению стационарного состояния, происходят при постоянной температуре. Величина нормальной компоненты электрического поля, присутствующая в правой части уравнения (17) зависит от величины заряда, помещенного на каплю:

$$E_r(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (20)$$

где q - электрический заряд, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость.

Поиск корней системы (17)-(20) уравнений был произведен при помощи пакета MathCad 7.0. Результаты расчета представлены на рис. 9 в виде зависимости толщины оболочки микросферы от величины заряда на поверхности (внутренний радиус микросферы - 100 мкм; начальная толщина оболочки - 10 мкм (кривая 1) и 100 мкм (кривая 2) микросферы равного 100 мкм и двух значений начальной толщины оболочки - 10 мкм.

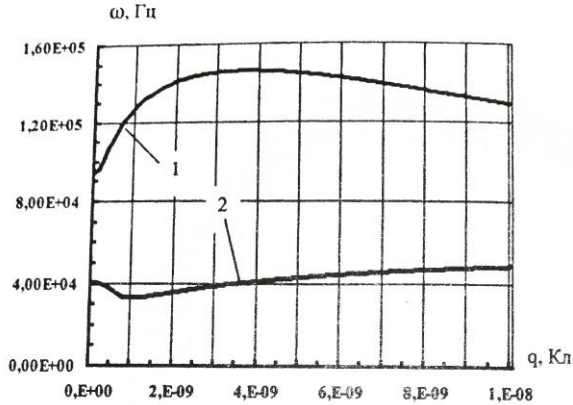


Рис.10

Аналогично главе 3, но с учетом поверхностного электрического заряда, рассмотрены колебания заряженной полой микросферы. С учетом возмущения потенциала электрического поля в динамическом граничном условии, получено дисперсионное уравнение, определяющее колебания и декремент в зависимости от толщины оболочки и поверхностного электрического заряда. Результаты исследований приведены на рис.10-11. На рис.10 показаны зависимости частоты колебаний оболочки от электрического заряда на поверхности (внутренний радиус микросферы - 100 мкм; начальная толщина оболочки - 10 мкм (кривая 1) и 100 мкм (кривая 2)). На рис.11 в качестве примера представлены результаты расчета декремента затухания колебаний нулевой гармоники полой сферы толщиной 10 мкм от внешнего радиуса при различных зарядах оболочки. Видно, что при малых диаметрах оболочки электрический заряд может существенно влиять на декременты колебаний, что следует учитывать при разработке технологий на основе заряженных полых микросфер.

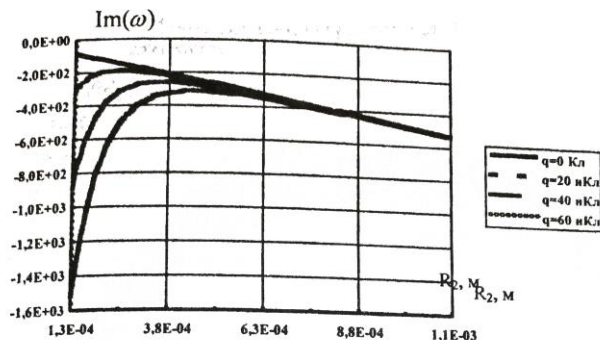


Рис.11
Рис.11

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ современного состояния нового научного и прикладного направления – физики и техники монодисперсных систем и технологий.
2. Исследовано движение цепочки капель металлов и сплавов в окислительной атмосфере и показан характер формирования диффузионного пограничного слоя кислорода; окисление одиночных капель металлов в цепочке может приводить к росту монослоя хемосорбированных атомов окисленного металла, что приводит к возможности двумерного фазового перехода в подобном монослое; рост монослоя сильно влияет на эффективное поверхностное натяжение поверхности металла в окислительной атмосфере, тем самым приводя к аномальности колебаний поверхности; колебания капель металла в окислительной атмосфере в значительной степени связаны с ростом монослоя окисленных атомов, что приводит к аномальным колебаниям поверхности капли и возникновению за малое время, сравнимое с временем распада струн металла к «замораживанию» колебаний, а, следовательно, к образованию определенной формы микросферы металла.
3. Полые сферические оболочки, заполненные газом, представляют собой интересные физические системы с особым поведением; они могут генерировать слаботатахующие акустические колебания на временах, интересных с точки зрения разработки монодисперсных технологий; наличие звуковых колебаний при колебаниях полых микросфер может приводить к их специфическому их взаимодействию через

акустическое поле, распространяемое в окружающей среде, что позволяет управлять потоками монодисперсных полых микросфер, заполненных газом; полые микросферы, заполненные газом могут являться уникальными акустическими резонаторами, что позволяет считать их элементами активной среды и дает возможность, по крайней мере теоретически сегодня, создать коллективный акустический усилитель или устройство типа лазера.

4. Изучение поведения жидких микросферических электрически заряженных оболочек, заполненных газом показало, что с ростом заряда поверхности по мере роста радиуса микрокапсулы толщина оболочки уменьшается, при значительных значениях величин зарядов толщина оболочки может достигать очень малых значений в десятки раз меньше, чем первоначальная толщина оболочки; очень быстро возрастает декремент затухания с ростом заряда даже при отсутствии учета проводимости жидкости, при чем для тонких оболочек величина декремента затухания настолько велика, что скорее всего с ростом заряда осесимметричные колебания поверхности будут несущественны; при всех значениях заряда декремент затухания колебаний второй гармоники близок к нулю; для нулевой гармоники влияние заряда приводит к большим значениям декремента затухания, а для второй гармоники частота колебаний быстро уменьшается до десятков герц.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. А.Ф.Гиневский, А.С.Дмитриев, Чен Юфен. Численное исследование гидродинамики и массообмена в упорядоченных капельных потоках // Тезисы докладов Третьей международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ-2000), Истра-Москва 2000г. - М.:МГИУ, 2000. С.108-110.
2. А.Ф.Гиневский, А.С.Дмитриев, Чен Юфен О колебаниях жидкой микросферической оболочки, заполненной газом// Инж.-физ. журнал. Т.74. № 1. 2001. С.3-7.
3. Е.В.Аметистов, А.Ф.Гиневский, А.С.Дмитриев, Чен Юфон. Некоторые задачи исследования монодисперсных микросфер и их потоков при генерации в осложненных условиях // Препринт МЭИ № 14-18, М.: Изд. МЭИ, 2001, 24 с.
4. Ginevskiy A.F., Dmitriev A.S., Chen Yu Feng. Oscillations hollow charge microspheres, filled in by gas// Abstracts of Papers European Aerosol Conf., Oxford, England, 2001, pp.1067-1069.

Печ. л. 1,2

НТБ МЭИ

Заказ 191



77858

казарменная, 13.