

Развитие космонавтики и фундаментальные проблемы газодинамики, горения и теплообмена



ОТРЫВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ КОНИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ ГАЗА И РЕЖИМЫ ОБТЕКАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЛ

М.А.Зубин, Н.А.Остапенко (Ин-т Мех.МГУ)

Опыт показывает, что возникновение развитых зон отрыва пограничного слоя и сопутствующих им волновых конфигураций внутри ударного слоя около пространственных тел со звездообразным поперечным сечением и V-образных крыльев может существенно изменять их режимы обтекания и, как следствие, приводить к скачкообразному изменению аэродинамических и тепловых нагрузок. В случае же приближения и выхода линии отрыва пограничного слоя к передним кромкам наблюдается либо разрушение конического течения, либо нестационарный режим обтекания.

Моделирование указанных явлений осуществляется при обтекании прямого двугранного угла. Одна из граней со стреловидной передней кромкой устанавливается под некоторым фиксированным углом атаки к набегающему потоку. Вторая грань, угол атаки которой варьируется, генерирует ударные волны с интенсивностью, достаточной для образования отрывного течения на смежной грани.

При числе Маха 3,04 и единичном числе Рейнольдса 10^8 м^{-1} с использованием различных экспериментальных методов изучена структура течения, реализующегося на пластине со стреловидной кромкой в условиях сжатого слоя при «свободном» и «несвободном» взаимодействиях ударных волн с пограничным слоем. Установлено, что возмущенное течение носит конический характер, который нарушается лишь в областях перехода пограничного слоя: в возвратном потоке отрывной области и в малой окрестности передней кромки на переходных режимах течения от «свободного» к «несвободному» взаимодействию.

Обнаружены дополнительные вихревые структуры в окрестности ребра двугранного угла, образующиеся с началом взаимодействия скачка уплотнения, присоединенного к стреловидной передней кромке пластины, с косым скачком уплотнения  - конфигурации ударных волн, сопутствующей развитому отрыву пограничного слоя. На этих же режимах течения поверхность контактного разрыва, исходящая из линии ветвления  - конфигурации ударных волн, сворачивается над линией присоединения оторвавшегося потока, что указывает на особое расположение точки (точек) Ферри в невязком ударном слое около прямого двугранного угла с коническим телом, имитирующим область отрыва пограничного слоя. Эти явления не наблюдаются, когда пластина, на которой развивается взаимодействие ударной волны с пограничным слоем, установлена по потоку.

Установлено, что «несвободное» взаимодействие в условиях ударного слоя может приводить к разрушению конического течения до выхода падающей ударной волны на переднюю кромку, если угол эффективного жидкого клина отрывной области превосходит значение, соответствующее звуковому течению на клине. Образующееся трехмерное течение стационарно. Головная ударная волна отсоединена на некотором начальном участке стреловидной передней кромки и присоединена к кромке вниз по потоку. На участке присоединения головной ударной волны в сжатом слое образуется течение с отрывом пограничного слоя, берущем свое начало в точке присоединения. Таким образом, в модельном эксперименте при выходе линии отрыва на переднюю кромку («несвободное» взаимодействие) реализуется переход от конического течения к стационарному трехмерному обтеканию двугранного угла с отсоединением ударной волны на некотором участке передней кромки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 00-01-00234, 03-01-00041).

АЭРОДИНАМИКА КОМПОНОВОК ТЕЛ С СЕТЧАТЫМИ ЭКРАНАМИ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

С.В.Гувернюк (Ин-т Мех. МГУ)

Проблемы торможения, спуска и посадки различных объектов в атмосферах планет, спасения капсул космических аппаратов (КА) с научной аппаратурой или результатами космических исследований и т.п. неразрывно связаны с исследованиями аэродинамики КА и их элементов при различных режимах обтекания. В ряде случаев в компоновке КА присутствуют элементы с проницаемыми поверхностями, например, сетчатые или перфорированные экраны в качестве отражателей радиоволн, теплового протектора, раскрывающегося лепесткового тормозного экрана или парашютного устройства. Теоретический расчет

аэродинамических характеристик космических аппаратов с проницаемыми экранами представляет существенные трудности, поскольку связан с решением как проблем определения параметров непосредственного воздействия газовой среды на проницаемую поверхность, так и с определением эффектов вторичного влияния распределенной неоднородности, образующейся в просочившемся через проницаемую поверхность потоке газа, на обтекание КА или его элементов, расположенных в аэродинамическом следе за проницаемой поверхностью.

В зависимости от степени разреженности газа возможны различные режимы обтекания проницаемых поверхностей, которые определяются наличием нескольких характерных линейных масштабов и, соответственно, – чисел Кнудсена. Гиперзвуковое свободномолекулярное обтекание сетчатых поверхностей и расположенных за ними тел исследовано теоретически и экспериментально в работах А.В.Шведова и др. Смешанный режим, когда в масштабе проницаемого экрана газ уже можно считать сплошной средой, но граничные условия все еще определяются свободномолекулярным обтеканием микроструктуры проницаемости, рассматривался В.Б.Христиничем.

С уменьшением числа Кнудсена наступает режим, когда газ необходимо рассматривать как сплошную среду на уровне всех масштабов. Это наиболее трудно исследуемый режим "сплошности". Граничные условия на проницаемом экране в этом случае представляют собой нелинейную систему соотношений на поверхности разрыва с поверхностными источниками импульса. Соответствующая геометрическая структура обобщенной ударной адиабаты включает ветви различной размерности (кривые, точки и конечные области), что приводит к возникновению различных схем обтекания проницаемых экранов, в частности, возможен режим двойного запирания, сопровождающийся образованием крупномасштабной неоднородной сверхзвуковой донной струи при обтекании проницаемых экранов с отошедшим скачком уплотнения .

В докладе представлены экспериментальные и расчетные данные о структурах течений газа около компоновок тел с передними проницаемыми экранами при обтекании на режимах "сплошности". Показано, что даже в случае экранов в виде слабо затеняющих гиперзвуковой поток редких сеток возможны аномальные структуры обтекания тела, что связано с влиянием наведенной поперечной неоднородности в сверхзвуковом потоке газа за проницаемой поверхностью.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ОТ СРЕЗА СОПЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДЛЯ СТРУЙ В СПУТНОМ ПОТОКЕ ВЫХОД НА АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

В.В.Цепляев, Б.П.Белоглазов (МАТИ)

Рассматриваются неавтомодельные задачи для плоского струйного течения несжимаемой жидкости в спутном потоке, характеризующимся одним параметром. Применён численный метод решения, обеспечивающий точное выполнение условия постоянства избыточного импульса.

Представляется параметрическое семейство решений для продольной скорости струй и аппроксимирующее выражение кривой границы перехода в автомодельный режим.

МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОЙ ВОЛНЫ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ И СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ В СПУТНЫЙ ПОТОК

*В.В.Заверуха, Ю.В.Ческидов
(ГКБ «Южное» им. М.К.Янгеля)*

Рассматривается инженерный метод расчёта газодинамических параметров среды при истечении струи в затопленное пространство и в спутный поток, который позволяет определить геометрическую форму и газодинамические параметры на первой «бочке» струи. Используются данные теоретических и экспериментальных исследований ГКБ «Южное», НИИТП (г. Москва), ЦНИИМаш (г. Москва), ЛМИ (г. Санкт-Петербург). Используется эмпирическая методика, учитывающая форму границы струи, скачков уплотнения в струе и во внешнем потоке. На основе этих зависимостей, а также классических газодинамических соотношениях построена приближенная методика расчетов газодинамических параметров внутри струи. Результаты могут быть использованы для расчета лучистых тепловых потоков в донной части РН с одно-сопловым двигателем в полете (с учетом внешнего потока).

Основные определяющие параметры:

1. отношение удельных теплоемкостей k_a и k_n газа струи и спутного потока;
2. число Маха на срезе сопла M_a ;
3. угол полураствора сопла θ_a ;
4. степень нерасчетности струи $n = P_a/P_n$;

5. 5. число Рейнольдса Re (в дальнейшем будем рассматривать струи, лежащие в автомодельной по числу Re турбулентной области $Re=10^5 \div 10^6$);
6. 6. число Маха спутного потока M_n .
7. 7. При больших нерасчетностях $n \gg 1$ угол полураствора сопла θ_a мало влияет на картину истечения струи.

Методика разрабатывалась для струй при следующих предположениях:

- газ струи идеальный;
- спутный поток сверхзвуковой;
- отсутствует перемешивание спутного потока с газом струи.

При решении задачи используются соотношения для изэнтропического течения, течения Прандтля-Мейера, эмпирические зависимости для формы границы струи, скачков, идущих от кромки сопла, и отраженного скачка уплотнения. Результаты расчета газодинамических параметров струи могут быть использованы для расчета лучистых тепловых потоков к донной теплозащите двигателя первой ступени.

Данная методика позволяет оперативно и с достаточной степенью точности рассчитывать газодинамические параметры струй, истекающих в затопленное пространство или спутный поток. Она наиболее хорошо применима для расчета струй с большой степенью нерасчетности. Результаты расчётов, проведенных по данному методу, согласуются с результатами расчётов, проведенных по точным методам, и дают удовлетворительное совпадение с экспериментом.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИХРЕВОГО СЛЕДА ЗА ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ И КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ

А.В.Коцеев (ЦАГИ)

Вихревой след за ЛА моделировался путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и уравнений переноса для нахождения распределения в вихре температуры и массовой концентрации простейших кластеров. Для учета стабилизирующего эффекта закрутки использовалась «к-эпсилон» модель турбулентности с модификацией турбулентной вязкости.

Расчет проводился для самолета Боинг-757 на режиме посадки. При рассмотрении задачи об образовании кластеров водяного пара в спутном следе учитывалось, что характерное время образования квазистационарного распределения кластеров паров воды по размерам 10^{-8} с, что существенно меньше характерного времени изменения газодинамических параметров в вихре за широкофюзеляжном пассажирском самолетом ($10^{-3} - 10^{-2}$ с). Поэтому для вычисления числовой плотности этих кластеров в вихревом следе за самолетом использовалась квазистационарная модель. При исследовании заряженных кластеров проводилось прямое численное моделирование кинетики их образования и диссоциации

ТЕПЛОЁМКОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА В ПРОЦЕССАХ ПРЕДКОНДЕНСАЦИИ

А.Ю.Хлопков (ФАЛТ МФТИ)

В последнее время все большее внимание уделяется клатратам метана. Они формируются в условиях высокого давления и низких температур. Клатраты или гидраты метана широко распространены в зонах вечной мерзлоты, как на суше, так и вне ее. Гидраты метана – потенциально огромный источник энергии по сравнению с другими известными залежами углеводородов. В данной работе сосредоточено внимание на термодинамических функциях кластеров воды, что в большой степени поможет понять в дальнейшем природу самих гидратов метана. Были проведены расчеты энергий и теплоемкостей различных кластеров при различных температурах и давлениях, их вклад в общую теплоемкость системы. Расчет теплоемкости димеров с помощью такого метода выявил очень интересную зависимость теплоемкости от температуры, обнаруживший у теплоемкости димера максимум в состоянии перегретого пара. Была построена зависимость теплоемкости от температуры много-меров, начиная с димера и заканчивая 21-мером. Из получившихся зависимостей теплоемкостей паров воды от температуры обнаружился большой вклад димеров в теплоемкость воды. При падении температуры растёт вклад димеров в общую теплоёмкость, что приводит к резкому росту теплоёмкости паров воды. Наблюдается хорошее совпадение расчета с экспериментом. Из проделанной работы, можно заключить, что для корректного описания термодинамических функций вещества, в частности воды и ее паров, необходимо учитывать вклад кластеров в общие свойства системы. В частности, ярко выражено отличие теплоемкости мономера воды и теплоемкости воды с учетом вклада димеров, тримеров и тетрамеров.

Автор выражает благодарность Б.В.Егорову за постановку задачи, Ю.Е.Маркачеву – за предоставленную программу расчета концентраций кластеров паров воды.

КИНЕТИКА ЗАРЯЖЕННЫХ КЛАСТЕРОВ В СТРУЯХ

*Б.В.Егоров, Ю.Е.Маркачёв, Е.А.Плеханов, И.С.Уфимцев, А.Л.Чугреев
(ЦАГИ)*

В настоящей работе изучалось образование простейших заряженных кластеров $H^+(H_2O)_n$, $OH^-(H_2O)_n$ и т.д. в условиях разряда активного самолетного компенсатора и выхлопной струи. Расчеты структуры и энергетики указанных кластеров проводились с помощью методов квантовой химии. Результаты квантово-химических расчетов использовались для получения энергии диссоциации и статистических сумм различных видов внутренних движений для всех рассмотренных кластеров для вычисления констант равновесия кластерных реакций, учитывающих ассоциацию и диссоциацию единственного мономера. Константы скоростей диссоциации оценивались согласно теории мономолекулярного распада, а константы скоростей образования вычислялись с использованием констант равновесия.

В рамках созданной кластерной кинетики было проведено численное моделирование: 1) течения в канале активного компенсатора электрического заряда самолета, 2) течения в выхлопной струе реактивного двигателя перспективного сверхзвукового пассажирского самолета.

Было показано, что основным носителем тока в коронном разряде в условиях влажной атмосферы (мольная доля паров воды 3%) являются кластеры $H^+(H_2O)_5$. Основным носителем тока в разрядном канале в условиях сухого воздуха в нижней тропосфере (мольная доля паров воды 10^{-6}) являются гидраты отрицательных ионов.

КРИТЕРИЙ КАЛО НАЧАЛА КОНДЕНСАЦИИ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЯХ ВЛАЖНОГО ГАЗА

*А.С.Артюхин (ФАЛТ МФТИ),
Б.В.Егоров (ЦАГИ)*

В работе изучается образование простейших кластеров паров воды в условиях адиабатического расширения влажного газа через сверхзвуковые сопла, а также в условиях, характерных для более медленных процессов, например, в камере Вильсона.

Одним из наиболее важных разделов теории двухфазных течений является кинетика конденсации. Классическая теория, базирующаяся на жидко-капельной модели не может быть применена к малым кластерам, образующимся на начальной стадии конденсации. Поэтому возникла необходимость обращения к квантово-статистическим методам описания нуклеации. Согласно экспериментальному критерию Кало критическим считается пересыщение, при котором отношение числовых плотностей димеров и мономеров равна 0.03-0.05. В настоящей работе отыскивалось множество точек пересечения расчётных кривых отношения числовых плотностей димеров к мономерам при различных температурах и прямых, отвечающих критерию Кало. Это множество точек давало зависимость критического пересыщения от температуры.

При рассмотрении процессов конденсации в свободно истекающей струе через звуковое сопло малого диаметром процесс оказывается неравновесным и полученные ранее функции распределения становятся неприменимыми. Возникает необходимость численно решать систему кинетических уравнений для реакций образования кластеров с учётом замораживания колебательной энергии межмолекулярных колебаний кластеров паров воды в сверхзвуковой струе. При этом оказывается сниженным порог реакции диссоциации кластеров. С учётом этого эффекта при значении энергии диссоциации димеров $E_2=1650K$ были рассчитаны значения параметров T_0 и P_0 в форкамере звукового сопла, при которых согласно экспериментальному критерию Кало начинается процесс конденсации в сверхзвуковой струе. Расчёты показали хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений критического пересыщения от температуры, а также давления и температуры T_0 и P_0 в форкамере звукового сопла, при которых начинается процесс конденсации.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

А.Н.Минайлос (ЦАГИ)

Предложен интегральный метод решения систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с четвёртым порядком точности аппроксимации, учитывающий нелинейные поправки Петухова. Метод позволяет для таких уравнений заменить известные и широко используемые методы типа методов Рунге, Адамса, Штёрмера и др., которые для нелинейных систем не обеспечивают точность выше второго порядка, и для которых в настоящее время не ясен путь введения поправок Петухова. На конкретных

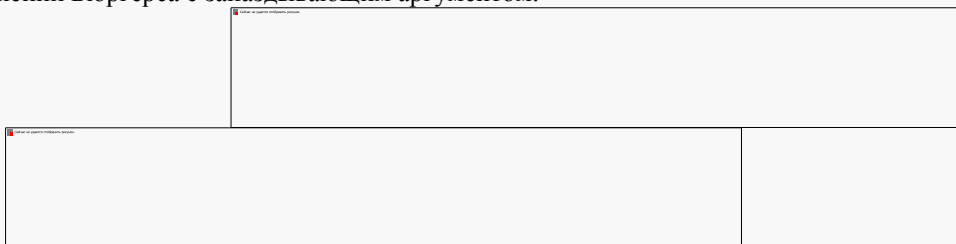
уравнениях, имеющих точные аналитические решения, исследован порядок аппроксимации численных решений и влияние степени нелинейности уравнений и размера счетного шага на этот порядок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (00-03-32066; 03-03-32061).

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВНУТРЕННИХ ТЕЧЕНИЯХ

*С.В.Дубинский, И.И.Липатов
(ЦАГИ)*

Исследованы процессы взаимодействия течения в пограничных слоях на стенках плоских каналов с невязким сверхзвуковым течением. Изучены такие режимы, для которых возмущения вносимые пограничным слоем на одной стенке влияют на течение в пограничном слое на другой стенке. Исследован режим больших амплитуд возмущений давления, инициируемых в области среза сопла или под влиянием деформации поверхности канала. В этих условиях процессы взаимодействия описываются системой уравнений Бюргерса с запаздывающим аргументом.



где знаки плюс и минус относятся к изменениям толщины вытеснения пограничных слоев на верхней и нижней стенках канала, соответственно.

Исследован также предельный случай малых величин параметра, пропорционального ширине канала. Показано, что предельный режим описывается модифицированными уравнениями Кортевега де Вриза, с решениями в виде уединенных волн.

Предполагается, что полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования работы сверхзвуковых экспериментальных аэродинамических установок.

ЯВЛЕНИЯ ПРЕДКОНДЕНСАЦИИ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА ПРИ ОБТЕКАНИИ ТОНКИХ ТЕЛ

*Е.А.Забабурин
(ТНК, г. Тюмень)*

Работа посвящена исследованию процесса предконденсации – начальному этапу конденсации газовой смеси при ее транспортировке.

Одной из проблем, возникающих в транспортных системах, является не достаточная изученность процессов, происходящих при открытии клапанов в системах хранения и транспортировки газа под высоким давлением, например, в магистральных трубопроводах. Происходящие в этот момент процессы приводят к возникновению сверхзвуковых потоков, образованию новых фаз, что в свою очередь приводит к резкому увеличению процесса эрозионного износа узлов клапана, возгоранию, образованию продуктов окисления серы.

В результате численного моделирования газодинамической картины течения в области клапана-источника выявлено сильное перерасширение газа при открытии арматуры и вследствие этого понижение его температуры, приводящее к возникновению двухфазности течения. Неравновесные задачи газодинамики решаются либо путем приближенного их сведения к одномерным описаниям с интегральным квазистационарным учетом областей существенной неоднородности (если такие области нельзя игнорировать), либо путем их моделирования на основе современных численных методов, опирающихся на использование ЭВМ.

В работе рассматриваются процессы неравновесного течения газа, происходящие в момент открытия клапана. На примере образования кластеров воды показана термодинамика газовой смеси в целом.

Автор выражает благодарность Б.В.Егорову за постановку задачи.

НЕИДЕАЛЬНАЯ ДЕТОНАЦИЯ И ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ДЕТОНАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

*Д.И.Бакланов, Л.Г.Гвоздева, Н.Б.Щербак
(ИТЭС ОИВТ РАН)*

В 60-е годы благодаря исследованиям русских ученых, в том числе благодаря работам Щелкина, был совершен прорыв в понимании детонации. Стало явным, что представление детонации в виде одномерной структуры детонационной волны: ударная волна – зона горения, является лишь удобной идеализацией процесса. Реальная структура детонационной волны представляет собой сложный трехмерный волновой комплекс, который можно охарактеризовать некоторой величиной, называемой размером детонационной ячейки λ , связанной со временем индукции горючей смеси. Было показано, что структура детонации при ее распространении в трубе диаметра d зависит от соотношения d/λ . Поэтому расчеты детонации по теории, не учитывающей тепловые потери из зоны реакции в стенки трубы, справедливы лишь для очень больших соотношений d/λ . В противном случае надо использовать модель детонации с потерями, предложенную Зельдовичем.

В пульсирующих детонационных двигателях (ПДД) предполагается использовать смеси тяжелых углеводородов с воздухом. Такие смеси плохо детонируют, обладают большими размерами детонационных ячеек, которые сопоставимы с поперечными размерами детонационных двигателей. В то же время большинство теоретических расчетов проводятся без учета тепловых потерь в стенки. Поэтому необходимо исследовать вопрос о правомерности применимости теории детонации без потерь к детонации в ПДД.

В работе приводятся результаты экспериментальных измерений скорости детонации и скорости волны разрежения в сгоревшем газе в смесях метана с кислородом в детонационной трубе, как в моноимпульсном режиме, так и в частотном режиме. Показано, что существует зависимость этих параметров от диаметра трубы и, соответственно, отклонение этих параметров от расчетных, в предположении идеальной детонации, в особенности сильное для волны разрежения в сгоревшем газе. Рассматривается метод расчета тяги и частотных характеристик ПДД, и приводятся оценки возможных отклонений от расчета за счет тепловых потерь.

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В.Е.Фортв, О.С. Ваулина, В.И. Молотков, О.Ф. Петров¹, Ю.П.Семенов², Г.Морфилл, Х. Томас³

¹*Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, г.Москва, Россия*

²*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева, г.Королев, Россия*

³*Институт внеземной физики общества М. Планка, Гархинг, Германия*

В пылевой плазме, которая представляет собой ионизированный газ, содержащий заряженные частицы вещества (пыль) микронных размеров, основным механизмом зарядки пылевых частиц являются потоки электронов и ионов (в условиях газового разряда). В результате более высокой подвижности электронов микронные частицы могут приобретать значительный отрицательный заряд (порядка 10^3 - 10^5 зарядов электрона) и электростатически взаимодействовать между собой.

При определенных условиях в пылевой плазме могут формироваться как стационарные пылевые структуры (подобно жидкости или твердому телу), так и сложные колебательные или хаотические движения. В лабораторных условиях наблюдаемые пылевые структуры удерживаются в поле тяжести Земли электрическим полем страты (в тлеющем разряде постоянного тока) или приэлектродного слоя (в вч разряде), а гравитационное поле оказывает лимитирующее влияние на результаты экспериментов.

В последнее время значительное внимание уделяется экспериментальным исследованиям пылевой плазмы в условиях микрогравитации. Такие эксперименты позволяют изучать широкий круг явлений (фотоэмиссионная зарядка атмосферного аэрозоля, амбиполярная диффузия, динамика массивных пылевых частиц большого размера >100 мкм и т.д.), наблюдение которых невозможно в лабораториях на Земле. Одним из существенных преимуществ экспериментов в условиях микрогравитации является возможность исследований в широком диапазоне параметров пылевой плазмы, не ограниченном условиями, обеспечивающими левитацию частиц в поле тяжести. В недавних экспериментах «Плазменный кристалл-3» (ПК-3), выполненных в пылевой плазме вч- разряда на Международной космической станции (МКС), российско-германской группой ученых обнаружен ряд новых явлений (формирование сложных кристаллических решеток, нелинейные волны, разноименная зарядка макрочастиц и т.д.), аналоги которых отсутствуют в обычных лабораторных условиях.

Эксперимент «Плазменный кристалл-3» является первым физическим экспериментом, выполненным на борту Российского сегмента Международной космической станции. Экспериментальная аппаратура была доставлена на борт МКС в феврале 2001 г., а первая серия исследований была осуществлена российскими космонавтами С.Крикалевым и Ю. Гидзенко при участии американского астронавта У. Шеппарда в марте 2001 г.

В данной работе представлен ряд результатов, полученных в ходе проведения экспериментов ПК-3, которые относятся к исследованию транспортных процессов таких, как самодиффузия макрочастиц в сильно-неидеальной пылевой плазме и динамика формирования пылевых вихрей. Рассматриваются различные транспортные характеристики пылевых частиц в плазме (такие, как заряд, коэффициент диффузии, парная корреляционная функция), приведены результаты численного моделирования динамики макрочастиц в дебаевских системах, а также рассмотрен один из возможных механизмов формирования пылевых вихрей. Приведены результаты и анализ экспериментов, которые проводились для монодисперсных полимерных частиц радиусом $a_p \approx 1.7$ мкм (плотность $\rho_p \approx 1.5$ г см⁻³, масса $m_p \approx 3.1 \cdot 10^{-11}$ г) в

широком диапазоне параметров плазмы, который обеспечивался путем изменения давлений $P = 0.36-0.98$ мБар и мощности $W = 0.15-0.98$ Вт емкостного вч- разряда в аргоне. Плотность n^p макрочастиц в пылевом облаке варьировалась в пределах от $0.95 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ до $1.25 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$.

ДИНАМИКА МАКРОЧАСТИЦ В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

О.Ф. Петров, О.С. Ваулина, В.И. Молотков¹, Ю.П.Семенов² и В.Е.Фортнов¹

¹*Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, г.Москва, Россия*

²*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П.Королева, г.Королев, Россия*

Пылевая плазма представляет собой частично ионизированный газ, содержащий заряженные частицы вещества (пыль) микронных размеров. Благодаря своим относительно большим размерам, пылевые частицы могут быть зарегистрированы видеокамерой, что значительно упрощает применение прямых бесконтактных методов для их диагностики. Пылевая плазма является хорошей экспериментальной моделью для изучения различных транспортных явлений в системах взаимодействующих частиц таких, как процессы зарядки и массопереноса, формирование пылевых структур и сложных колебательных режимов и т.д. В последнее время значительное внимание уделяется экспериментальным исследованиям пылевой плазмы в условиях микрогравитации. Такие эксперименты позволяют изучать широкий круг явлений (фотоэмиссионная зарядка аэрозолей в верхних слоях атмосферы, амбиполярная диффузия, динамика крупных пылевых частиц >100 мкм в плазме и т.д.), наблюдение которых невозможно в лабораториях на Земле.

Данная работа посвящена одним из первых экспериментов по изучению динамики макрочастиц в условиях микрогравитации, которые были выполнены на борту космической станции «Мир». Эксперименты проводились для больших частиц бронзы (с размерами порядка 100 мкм) в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

В работе представлены результаты экспериментального исследования динамики макрочастиц бронзы в плазме тлеющего разряда постоянного тока в условиях микрогравитации. Измерены температуры, концентрации, парные корреляционные функции, коэффициенты самодиффузии и заряды макрочастиц при различных разрядных токах. Анализ полученных результатов показывает, что наблюдаемые структуры макрочастиц являются сильно-неидеальной пылевой жидкостью ($\Gamma^* \approx 60-75$), а их динамика хорошо согласуется с результатами моделирования дебаевских систем со слабым экранированием ($\kappa < 1$). Регистрируемая зависимость среднеквадратичного отклонения для отдельных макрочастиц от времени была характерна поведению системы вблизи линии фазового перехода жидкость-кристалл. При этом нормированный параметр неидеальности был заметно ниже его величины $\Gamma_c \approx 102$ на линии кристаллизации системы. Данное обстоятельство может быть связано, как с полидисперсностью исследуемых частиц, так и с возможным снижением критической величины Γ_c вследствие конечных размеров пылевого облака.

Экспериментальные оценки зарядов макрочастиц соответствовали поверхностным потенциалам $\sim 30-40$ В, что значительно выше величин, прогнозируемых ОМЛ теорией. Данное отличие может быть связано как с уменьшением эффективного ионного потока на частицы с радиусом, большим длины свободного пробега ионов, так и с увеличением электронной температуры в пылевом облаке. Показано, что изменение процессов равновесной ионизации в плотных пылевых облаках могут приводить к значительному увеличению средних энергий электронов и концентрации плазменной компоненты.

В заключение еще раз отметим, что эксперименты по исследованию потенциалов взаимодействия и процессов зарядки для больших частиц в пылевой плазме практически не осуществимы в условиях силы тяжести Земли.

Данная работа была частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 01-02-16658 и фондом INTAS, проекты № 2001-0391 и № 2000-0522.