

ВСЕСОЮЗНАЯ ЗИМНЯЯ ШКОЛА-СЕМИНАР ПО МЕХАНИКЕ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД

Школа была организована Научно-исследовательским институтом прикладной математики и механики (НИИПММ) при Томском государственном университете совместно с Институтом механики МГУ, Институтом теоретической и прикладной механики СО АН СССР и Вычислительным центром АН СССР (председатель Оргкомитета — А. Д. Колмаков, заместитель председателя — А. М. Гришин) и проходила с 20 по 28 февраля 1973 г. в Богашово под Томском.

Тематика школы была посвящена вопросам кинетической теории газов с химическими реакциями, течениям химически реагирующих газов и жидкостей, течениям двухфазных сред, задачам теории горения.

В работе школы участвовали около 60 ученых, активно работающих по указанной тематике. Было заслушано 32 доклада, после которых проходило их обсуждение и дискуссии. Дискуссии оказались очень полезными для всех участников, в частности для молодых ученых из Томска, активно начинающих научную работу по ряду затронутых в школе проблем. В ходе работы школы были установлены полезные научные контакты ученых из Москвы, Ленинграда, Новосибирска с сотрудниками НИИПММ при ТГУ. Участники школы ознакомились с исследованиями, проводимыми в НИИПММ и ТГУ и перспективами развития механики в Томске.

Полное содержание представленных докладов будет опубликовано в журнале «Физика горения и взрыва».

В. А. Полянский, Е. Г. Колесниченко (Москва). *Кинетическая теория химически реагирующих смесей газов.*

На примере газовой смеси, в которой протекают одноуровневые обменные химические реакции, рассматривались основные схемы решения уравнений Больцмана, записанных в виде

$$(1) \quad \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + v_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial r} = \frac{1}{\epsilon} J_\alpha + \frac{1}{\mu} R_\alpha$$

Здесь f_α , v_α — функция распределения и скорость частицы сорта α , J_α , R_α — интегралы, описывающие упругие столкновения и столкновения с химической реакцией. Первая схема метода Чепмена — Энскога: $\epsilon \ll 1$, $\mu \sim 1$. Эта схема описывает течение, близкое к замороженному. В нулевом приближении функция распределения максвелловская с произвольными плотностями компонент. Пространственно-временная зависимость для гидродинамических переменных в нулевом приближении описывается уравнениями Эйлера с неравновесными химическими реакциями. Константы скоростей реакций вычисляются по максвелловским функциям распределения. В первом приближении для гидродинамических переменных имеют место уравнения Навье — Стокса с коэффициентами переноса (вязкости, теплопроводности, диффузии и т. д.), не зависящими от протекания химических реакций. Изложенная схема в некоторых случаях дает большие различия в константах скоростей реакций, вычисленных в последовательных приближениях.

Вторая схема: $\epsilon \sim \mu \sim 1$. Эта схема пригодна только для течений, близких к равновесным. В нулевом приближении функция распределения максвелловская и плотности компонент удовлетворяют закону действующих масс. Для гидродинамических переменных в нулевом приближении имеют место уравнения Эйлера с равновесными химическими реакциями. В уравнениях первого приближения учитывается влияние процессов с реакциями на явления переноса.

Б. В. Алексеев, Г. В. Нестеров (Москва). *Применение метода Монте-Карло для решения задач физической кинетики для систем с примесью инородных частиц и моделирования процессов переноса в плазмотронных установках.*

Развит численный метод, относящийся к классу методов Монте-Карло, в применении к плазмохимическим процессам, протекающим в сильном электромагнитном поле. Рассмотрена пространственно-однородная и неоднородная релаксация электронного и ионного облака при наличии неупругих столкновений. Получены профили температуры, скорости дрейфа, теплового потока. Осуществлено сравнение решения, найденного методом Монте-Карло, с решением полученным методом возмущений. Все расчеты проведены для случая частично-ионизованного газа, когда число столкновений заряженных частиц между собой много меньше числа их столкновений с нейтралами.

Г. А. Лукьянов (Москва). *О применении метода Монте-Карло к некоторым задачам разрежения разреженных струй.*

Обсуждаются возможности метода Монте-Карло для решения линейных и нелинейных задач динамики разреженных газов. В качестве линейной задачи рассмотрена задача о рассеянии гиперзвукового потока на сверхзвуковой струе газа при свободномолекулярном режиме взаимодействия. В качестве нелинейной задачи решалась задача о сферическом расширении одноатомного газа в среду низкой плотности.

Н. А. Еремян, Г. А. Тирский, О. Н. Сулов (Москва). *Уравнения частично-ионизованного многокомпонентного газа с точными коэффициентами переноса.*

Для расчета коэффициентов переноса частично-ионизованной многокомпонентной смеси газов по методу Чепмена — Энскога необходимо учитывать высшие приближения. Обычная процедура метода Чепмена — Энскога, дающая выражение для потоков вещества и энергии через «силы» (градиенты концентраций, температуры, давления) приводит к сложным формулам для коэффициентов переноса в виде отношения определителей порядка $N\xi$, где N — число компонент, ξ — число приближений. В работе дана процедура получения уравнений переноса в виде выражений для «сил» через потоки. Эти уравнения вообще не содержат определителей, а в качестве коэффициентов в них входят функции, линейным образом выражающиеся непосредственно через интегралы столкновений.

Использование этих уравнений переноса позволяет записать основную систему уравнений в виде системы, разрешенной относительно производных первого порядка от потоков, температуры и концентраций. Такая форма записи уравнений весьма удобна для численного интегрирования.

И. П. Гинзбург, Т. Н. Рябинина, Л. И. Шую, В. А. Коробков (Ленинград). *О некоторых математических моделях течения многоскоростной и многотемпературной смеси газа с инородными частицами в сверхзвуковой струе.*

Исходя из общих уравнений движения полидисперсной двухфазной среды, рассматривались некоторые стационарные течения в предположении, что эффекты вязкости и теплопроводности газа проявляются только во взаимодействии с частицами. В относительном движении фаз учитывались эффекты инерционности, сжимаемости и разреженности газа.

Решена задача о движении двухфазной смеси от сферического источника. Сеточно-характеристическим методом решена задача об истечении двухфазной струи в вакуум с учетом обратного влияния частиц на газ. Рассмотрена задача о двухфазном течении в центрированной волне разрежения.

С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, Шрейбер И. Ф. (Новосибирск). *Эволюция возмущений в двухфазной среде.*

На основе общей теории слабонелинейных волн в средах с диссипацией и дисперсией рассмотрено несколько задач из области волновой динамики двухфазных сред. В предположении справедливости приближения пограничного слоя исходных уравнений показана возможность существования прогрессивных волн на поверхности вертикально стекающей пленки в пренебрежении поверхностным натяжением. На основе квазигомогенной модели смеси рассмотрено распространение длинноволновых возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа. Для возмущений скорости получено уравнение Бюргера — Картвега — де Вриза; найдены нестационарные решения этого уравнения.

В. А. Шваб (Томск). *Турбулентность и диффузионные процессы в потоках двухфазных смесей.*

Методом теории размерностей рассматривается локальная турбулентность как суперпозиция движений различных масштабов несущей среды и твердых примесей. Генерируемая потоком удельная энергия турбулентности в единицу времени и отнесенная к единице плотности смеси определяется наибольшими масштабами несущей среды и твердых примесей. Движение частиц примесей осуществляется за счет энергии несущей среды, и поэтому при переходе к меньшим масштабам передается в основном энергия последней. Дается оценка по главным масштабам касательного напряжения в пристеночной области турбулентного потока, а также турбулентного переноса тепла в турбулентном ядре потока.

П. И. Усик (Москва). *Модель вязкоупругой анизотропной среды.*

Построена замкнутая система уравнений движения двухфазной многокомпонентной анизотропной сплошной среды с учетом происходящих в ней механохимических

процессов; полученные уравнения предлагаются для описания поведения активной мышечной ткани. Фаза, в которой происходят механохимические реакции, считается вязкоупругой, другая фаза — упругой, среда предполагается односкоростной, но допускается переход компонент из одной фазы в другую. Выписаны законы сохранения и в соответствии с общими принципами механики сплошной среды и термодинамики необратимых процессов получены реологические уравнения. Показано, что построенная модель описывает такие характерные свойства мышечной ткани, как существование напряжений при отсутствии деформаций, деформирование при отсутствии нагрузки, диссипацию энергии в состоянии механического равновесия и т. д.

С. А. Лосев (Москва). *Кинетика релаксационных процессов в ударных волнах и охлаждающихся потоках газов.*

В этом докладе были рассмотрены проблемы феноменологического описания кинетики физико-химических процессов в газах. При описании колебательной релаксации в сильных ударных волнах использование соотношений Ландау — Теллера оказывается недостаточным; в докладе приведено простое выражение, в первом приближении учитывающее влияние ангармоничности на величину времени колебательной релаксации. Для двухатомных молекул времени колебательной дезактивации при охлаждении газа практически совпадает со временем колебательного возбуждения. Приведены результаты эксперимента по изучению кинетики диссоциации двухатомных молекул в ударных волнах в отсутствие колебательного равновесия. Рассмотрены феноменологические соотношения, позволяющие дать непротиворечивое описание экспериментальных результатов в этих условиях.

Ю. П. Головачев, Ф. Д. Попов (Ленинград). *Исследование гиперзвукового обтекания затупленных конусов вязким газом с учетом реальных физико-химических процессов.*

На основе упрощенных уравнений Навье — Стокса рассмотрено гиперзвуковое обтекание сферически затупленных конусов воздухом с учетом равновесных физико-химических реакций и радиационного переноса энергии. Учитывалось излучение воздуха в непрерывном спектре, системах молекулярных полос и спектральных линиях. Течение в ударном слое рассчитывалось методом установления с применением невязной разностной схемы. Получено распределение параметров течения в ударном слое, тепловой поток и коэффициент трения.

Н. В. Леонтьева, Ю. П. Лунькин, А. А. Фурсенко (Ленинград). *Обтекание затупленных тел неравновесно-ионизованным излучающим газом.*

Численно исследовалось гиперзвуковое обтекание сферического затупления неравновесно-ионизованным одноатомным невязким излучающим газом с учетом опережающего излучения. В области между ударной волной и поверхностью тела учитывались столкновительная ионизация через возбужденный уровень и передача энергии от тяжелых частиц электронному газу в результате упругих столкновений электронов с ионами и атомами, а также фотоионизация с основного уровня и поглощение резонансного излучения. Учитывалось также излучение, возникающее при захвате электронов на возбужденные уровни.

В. Б. Миносцев, В. П. Шкадова, А. К. Бурдельный (Москва). *Пространственное обтекание тел химически реагирующим идеальным газом.*

В докладе приводились результаты расчетов пространственного обтекания сегментально-конического тела неравновесным воздухом при углах атаки до 25° . Воздух считался идеальным газом. Рассматривались компоненты O_2 , N_2 , NO , O , N , O_2^+ , N_2^+ , O^+ , NO^+ , e ; между которыми протекали 13 химических реакций и учитывались энергии колебательных мод e_{vO_2} и e_{vN_2} . Приводились результаты расчетов пространственного равновесного обтекания лобовой поверхности тела. Показано, что упрощающее предположение о равновесном характере течения в ударном слое у лобовой поверхности тела позволяет с хорошей точностью получить распределение газодинамических параметров в сверхзвуковой области обтекания сегментально-конического тела. Однако правильное распределение химических компонент может быть получено лишь при расчетах с использованием уравнений химической кинетики во всем ударном слое.

В. П. Стулов (Москва). *О вырождении уравнений движения вязкого химически реагирующего газа в условиях, близких к равновесию.*

Методом М. И. Вишика и Л. А. Люстерника строится асимптотическое решение уравнений вязкого газа для околоравновесных течений n -го порядка, которое всюду в области, в том числе и вблизи границы, удовлетворяет уравнениям и граничным

условиям с точностью до членов $O(\epsilon^{n+1})$. С использованием некоторых упрощающих предположений построено в явном виде решение нулевого порядка для химически реагирующего газа и двумературной плазмы. Оказалось, что в химически реагирующем газе пограничный слой, связанный с неравновесностью реакции на стенке, имеет место не только для концентрации, но и для температуры.

В. Д. Виленский, Б. С. Петухов, В. К. Шиков (Москва). *Гидродинамика и теплообмен при течении реагирующих газов в трубах.*

В докладе были рассмотрены особенности постановки задачи о теплообмене при течении в трубах диссоциирующих газов. Низкотемпературный характер реакций диссоциации, используемых в теплообменных устройствах, ведет к изменению состава газа на стенке канала по длине и к связанному с этим изменению энтальпии газа на стенке. Это оказывает существенное влияние на характер теплоотдачи диссоциирующим теплоносителям. Указанные особенности существенно отличают постановку задачи о теплообмене при течении реагирующих газов в каналах от задачи о теплообмене в диссоциирующем пограничном слое при внешнем обтекании.

Обсуждался вопрос о необходимости учета влияния турбулентных пульсаций температуры на скорости химических реакций при рассмотрении турбулентных течений реагирующих газов.

Сделан обзор состояния расчетных и экспериментальных работ по теплообмену при течении диссоциирующих газов в трубах.

А. П. Алдушин, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский (Москва). *Автоколебательные явления при распространении фронта экзотермической реакции в конденсированных средах.*

В докладе были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения фронта экзотермической реакции в гомогенных и гетерогенных конденсированных средах. Показано, что при определенных условиях вследствие избытка энтальпии во фронте стационарное горение становится неустойчивым и процесс распространения реакции имеет автоколебательный характер. Определены условия возникновения автоколебательного режима горения, исследованы динамика и структура пульсаций. Показано, что результаты теоретических исследований согласуются с экспериментальными данными, полученными при синтезе неорганических соединений в волне горения.

А. Г. Истратов, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе (Москва). *Об устойчивости горения пороха, обдуваемого потоком газа.*

Анализировалась устойчивость горения пороха в потоке газов по отношению к пространственным искривлениям поверхности горения для модели, основанной на предположении о том, что химические реакции в газовой зоне горения протекают в узкой зоне, толщина которой намного меньше толщины зоны прогрева.

Применение метода малых возмущений приводит к характеристическому уравнению, определяющему собственные частоты задачи. Анализ его показывает, что совместное влияние кривизны поверхности и касательного потока газов приводит к появлению новых областей неустойчивого горения. Характеристическая частота на границе устойчивости является чисто мнимой величиной, т. е. малые возмущения распространяются вдоль горячей поверхности пороха в виде периодической волны малой амплитуды.

В. Б. Либрович (Москва). *О бегущих волнах на поверхности пламени, рассматриваемом как гидродинамический разрыв.*

Исследовалось решение гидродинамической задачи типа периодической бесконечной волны, распространяющейся с постоянной скоростью вдоль поверхности фронта ламинарного пламени. Была сформулирована постановка задачи для нелинейных волн. Определены необходимые и достаточные условия, характеризующие зависимости скорости пламени и плотности горячего газа от искривлений фронта пламени в случае пламен с большим тепловым эффектом, при которых существует волновое решение. Проанализированы различные феноменологические модели искривленного фронта пламени с точки зрения существования волновых решений и получены формулы для скорости распространения волны.

Т. В. Быстрова, В. Б. Либрович, В. И. Лисицын (Москва). *Элементы теории горения в газолазерной резке металлов.*

Процесс газолазерной резки (ГЛР) представляет собой совместное воздействие лазерного излучения и газовой струи на металл, приводящее к его плавлению и

гидродинамическому удалению из зоны реза. В работе было предложено модельное описание ГЛР, включающее в себя гидродинамическое влияние газовой струи и зависимость глубины окисления от условий процесса. Анализ модели показывает, что положение поверхности реза, ее температура и глубина окисления существенно зависят от гидродинамики истечения жидкого расплава из зоны реза. Численные расчеты качественно совпадают с экспериментальной зависимостью скорости резания от расхода в газовой струе. Проводится аналогия описания модели ГЛР с постановкой задач в теории горения, для которых существенно понятие «поверхность горения» (например, горение порохов с диспергированием).

А. М. Гришин (Томск). *Сопряженные задачи теплообмена в реагирующих средах.*

Анализируются некоторые нестационарные задачи, решение которых необходимо получать из совместного решения уравнений в газовой и твердой фазах. Обсуждалась допустимость квазистационарной постановки для решения уравнений движения в газовой фазе для ряда конкретных случаев.

А. М. Гришин, В. И. Зинченко (Томск). *Решение некоторых нестационарных задач тепло- и массообмена с учетом гетерогенных и гомогенных реакций.*

Должено численное решение двух задач. В первой задаче решаются нестационарные уравнения пограничного слоя в окрестности критической точки, когда холодный поток смеси CO и O_2 набегает на горячее тело с постоянной температурой поверхности. Получены режимы горения смеси и установлено, что при достаточно больших значениях числа Дамкеллера в газовой смеси по крайней мере для начальных моментов времени реализуются термокинетические колебания.

Во второй задаче гомогенные реакции отсутствуют, а на поверхности протекают две гетерогенные реакции ($\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$, $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$). Установлено, что допущение о квазистационарности процессов в газовой фазе приводит к погрешности определения температуры на поверхности стенки.

В. А. Левин, Б. П. Соломаха, С. П. Чикова (Москва). *Об устойчивости плоской детонационной волны.*

Рассматривалась устойчивость плоской детонационной волны в канале постоянного сечения. Показано, что детонационная волна с двухфронтной структурой всегда оказывается неустойчивой при любой энергии активации индукционного периода и любой степени пересжатости волны. Обнаружено, что для любой степени пересжатости детонационной волны существует критическая энергия активации, при которой все коэффициенты отражения и преломления малых возмущений обращаются в бесконечность. Начиная с этой энергии активации, фронт тепловыделения может распасться внезапно, приобретая новую скорость и генерируя вверх и вниз по потоку центрированные волны разрежения или скачки уплотнения.

Э. А. Гершбейн (Москва). *Теория вязкого ударного слоя с химическими реакциями при сильном вдуве.*

Асимптотическим методом исследовалось течение вязкого теплопроводного многокомпонентного химически реагирующего газа в ударном слое на плоских или осесимметричных гладких затупленных телах при сильном вдуве смеси инородных газов. При этом течение в ударном слое распадается на три характерные области. В областях, примыкающих к поверхности тела и к ударной волне, эффекты, связанные с молекулярным переносом, несущественны, а в промежуточной области они играют основную роль. При нахождении решения в первых двух областях область молекулярного переноса заменяется поверхностью контактного разрыва (внешняя задача). В гиперзвуковом приближении получено аналитическое неавтомодельное решение внешней задачи. Найдены профили скоростей, температур и концентраций компонент поперек ударного слоя, а также положение контактной поверхности и отход ударной волны.

Течение в вязкой области ударного слоя (внутренняя задача) описывается уравнениями пограничного слоя с асимптотическими условиями на плюс и минус бесконечности, определенными из внешнего решения. На ЭВМ получено численное решение внутренней задачи с учетом многокомпонентной диффузии и теплообмена.

Л. И. Скурин (Ленинград). *О расчете пульсационных характеристик в дальнем следе за телом.*

На основе полуэмпирически замкнутых уравнений баланса вторых моментов пульсационных полей температуры и концентрации реагирующей примеси исследовалось влияние химической реакции типа диссоциативной рекомбинации на асимпто-

тическое (при стремлении продольной координаты к бесконечности) поведение пульсаций электронной концентрации в следе за телом. Полученные результаты свидетельствуют о том, что химическая реакция приводит к значительному увеличению внеосевого максимума в профиле пульсаций и к уменьшению значения относительных пульсаций на оси следа.

Е. Ф. Жигалко (Москва). *Приближенные решения задач газодинамики с сильными ударными волнами.*

Приводились результаты, полученные с помощью линейного приближения к автомоделным задачам о взаимодействии ударной волны с жесткими стенками. Рассмотрена возможность расширения класса задач, описываемых этими решениями, с помощью принципа суперпозиции.

А. М. Гришин, А. Я. Кузин (Томск). *Решение некоторых обратных задач теплообмена.*

Численно решены две одномерные обратные задачи теплообмена. В первой задаче тепловой поток на границе раздела сред со стороны твердой фазы восстанавливается по известной температуре поверхности раздела сред. Во второй задаче теплопроводности с гомогенными реакциями по известной температуре поверхности определяется энергия активации и предэкспоненциальный множитель.

В. А. Шваб, В. А. Лошкарев (Томск). *Некоторые вопросы исследования абляционного разрушения теплозащитного покрытия на основе высокополимеров.*

В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования абляционного разрушения материалов на основе высокополимеров. Качественно и количественно, используя данные рентгеноскопического, рентгеноструктурного и специальных спектральных исследований, исследована картина структурных изменений в обугленных экранах и их влияние на абляционную стойкость покрытий в условиях воздействия высоких температур, скоростей и давлений газового потока.

А. М. Гришин, А. С. Якимов (Томск). *Решение некоторых задач о термохимическом разрушении и горении реагирующих твердых тел.*

Численно решались задачи о воспламенении и горении пористых реагирующих тел. Установлено, что время воспламенения при прочих равных условиях уменьшается с ростом проницаемости реагента, а скорость горения, наоборот, растет с ростом пористости. Сообщены результаты численного решения задачи о горении полиметилметакрилата в потоке кислорода.

В. Е. Аболтусов, Т. Н. Исаков (Томск). *Экспериментальное исследование нестационарных процессов тепломассообмена реагирующих тел с потоком нагретого газа.*

Было исследовано влияние параметров набегающего потока окислительного газа на макрохарактеристики воспламенения и горения коксующихся и углеграфитных материалов. На примере электродного графита показана возможность применения некоторых теоретических формул для расчета времени гетерогенного воспламенения.

М. Н. Баулин, А. С. Мкртумов, С. Ю. Чернявский (Москва). *Обтекание движущихся с большой скоростью затупленных тел смесью водорода с кислородом.*

Сообщены результаты разработки экспериментальной установки для исследования обтекания тел, движущихся с большой скоростью в горючей смеси газов. Проведены систематические экспериментальные исследования пилрен-методом влияния давления стехиометрической смеси водорода с кислородом ($p=50, 100, 186, 250$ и 380 мм рт. ст.) и скорости полета ($v=2.57\div 3.30$ км/сек) на картину течения газа вблизи затупленной цилиндрической модели диаметром 12.7 мм.

Г. А. Тирский