

УДК 531/534:061.3

VII ШКОЛА-СЕМИНАР
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ»

(Севастополь, 10—19 сентября 1994 г.)

Школа-семинар, организаторами которой являются Институт механики Московского государственного университета и Научный совет по механике жидкости и газа Российской Академии наук, проходила с 10 по 19 сентября 1994 г. в г. Севастополь. Несмотря на сложные экономические условия, в которых существует сегодня наука в России, в работе школы принял участие 81 ученый из университетов и институтов Российской Академии наук, крупнейших отраслевых исследовательских центров: ЦАГИ, ЦИАМ, ЦНИИМаш и др. Среди участников — академик и 2 члена-корреспондента Российской Академии наук, 3 действительных члена и 4 члена-корреспондента РАЕН, академик региональной академии наук России, 31 доктор и 38 кандидатов наук. В работе школы-семинара участвовали 12 молодых ученых.

Заслушано 35 пленарных и 26 стендовых докладов. Проведен круглый стол «Вычислительная механика». В ходе заседаний обсуждались актуальные проблемы, охватывающие широкий круг фундаментальных и прикладных задач, в решении которых основную роль играет механика жидкости и газа.

Школа-семинар прошла организованно и на высоком научном уровне. Она подтвердила эффективность подобных встреч для апробации научных идей; участие в работе школы будет способствовать высокому уровню исследований по механике жидкости и газа и в сопредельных областях.

Участники школы выразили обеспокоенность в связи с небольшим числом молодых ученых, принявших участие в ее работе, и озабоченность по поводу распада научного сообщества бывшего СССР.

Ниже представлены краткие аннотации докладов, позволяющие получить более конкретное представление о рассмотренных вопросах.

Якимов Ю. Л. *Волновые движители судна.*

Рассматриваются движители судна, использующие энергию морских волн. Основной элемент движителя — крыльевой профиль, на который действует гидродинамическая сила, имеющая составляющую в направлении движения судна. Эта сила обусловлена движением воды, вызванным ходом судна и его качкой, а также орбитальным движением воды в волне. При этом крыло в зависимости от направления потока поворачивается на ограниченный угол вокруг оси, закрепленной на корпусе судна. Результаты расчета на основе линейной теории качки для регулярного волнения хорошо согласуются с модельными экспериментами в гидроканале Института механики МГУ.

Степанов Г. Ю. *Принцип максимального расхода в гидродинамической теории водослива и закрученных течений в круглой трубе.*

Принцип максимального расхода с образованием критического течения ($Fr = 1$) обоснован гидродинамической (квазистационарной) теорией водослива с широким порогом и закрученного течения в круглой цилиндрической трубе. В двумерной теории (точной для водослива и в приближении узких полос для закрученных течений) максимальному расходу соответствует однородное в бесконечности слабо надкритическое течение ($Fr > 1$). Рассматриваемый принцип как эвристический применим также для течений с потерями механической энергии при турбулентном выравнивании потока эффективно невязкой жидкости через водослив с горизонтальным щитом, в трубе с внезапным расширением и через насадки Борда.

Терентьев А. Г. *Численное исследование в гидродинамике методом граничных элементов.*

Интегральное соотношение Грина, которое применяется в методе граничных элементов, справедливо лишь для ограниченных функций и оно не может быть использовано непосредственно для вычислений

потенциала скорости или функции тока. Получены видоизмененные интегральные соотношения для функций, имеющих особенности типа кратных полюсов внутри области, включая бесконечно удаленную точку. Для численного исследования можно использовать как потенциал скорости, так и функцию тока. Показано, что для численной реализации и точности расчетов функция тока предпочтительней. Предложены алгоритмы расчетов обтекания системы произвольных тел. В качестве иллюстрации рассмотрены профили Жуковского.

Кузнецов В. М., Минайлос А. Н. *Задачи механики и теория случайных процессов.*

Создан комплекс программ для расчета движения (системы) тел с учетом воздействия на траектории возмущений начальных условий и изменения правых частей уравнений движения. Набор случайных начальных параметров в каждом вычислительном опыте задается с помощью функций распределения отдельных его компонент, заданных дисперсиями, и выборки случайных чисел. Аналогично определяются значения параметров в коэффициентах уравнений движения на траектории, если эти параметры носят случайный характер. В ряде вычислительных опытов рассчитываются значения параметров движения в конечной точке траектории и определяются конечные функции распределения.

Демьянов Ю. А. *Перспективность использования потоков за ударными волнами, движущимися в покоящуюся среду, для изучения процессов перехода в пограничном слое.*

Развивается предложение автора о перспективности использования потоков за ударными волнами, движущимися в покоящуюся среду, для изучения проблемы перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный при транс- и сверхзвуковых скоростях. При проведении экспериментов в ударных трубах из-за возможности точного численного моделирования фонового шума, обусловленного пограничным слоем, который формируется на их стенках, досье об условиях испытаний может быть представлено. Для расчета нестационарного пограничного слоя, обусловленного как собственным шумом от формирующегося пограничного слоя на модели, так и фоновым шумом ударной трубы, может быть использован имеющийся методический задел. Подчеркнута существенность колебаний поперечной составляющей скорости потока в ударной трубе, трехмерного характера акустических возмущений и возмущений скорости в пограничном слое.

Григорян С. С. *Точное решение задачи о газодинамике генератора Войтенко.*

Построено точное решение задачи о нестационарном двумерном автомодельном течении идеального, совершенного, первоначально покоившегося газа в угловой области между двумя плоскостями, одна из которых неподвижна, а другая начинает двигаться с постоянной скоростью. Это решение может использоваться в качестве асимптотики для описания течения в окрестности угловой точки в задаче о газодинамическом генераторе Войтенко.

Голубкин В. Н., Баранов А. В. *Гиперзвуковое обтекание V-образных крыльев.*

В результате решения задачи гиперзвукового обтекания V-образного треугольного крыла под углом атаки методом тонкого ударного слоя дана классификация режимов поперечного течения за отсоединенным головным скачком на нижней поверхности в зависимости от параметров подобия. Для Λ -крыльев, как и для плоского крыла, возможны два типа течений: с линией растекания в плоскости симметрии или с линией стекания в плоскости симметрии и линией растекания около передней кромки. В случае V-крыльев наряду с этими типами возникает более сложная схема течения с линиями растекания в плоскости симметрии и вблизи передней кромки, а также дополнительной линией стекания между ними.

Зубин М. А., Остапенко Н. А., Чулков А. А. *Обтекание и моделирование аэродинамического сопротивления звездообразных тел при гиперзвуковых скоростях потока.*

Изучена возможность описания аэродинамического сопротивления пирамидальных звездообразных тел при гиперзвуковых скоростях в рамках конического течения с использованием моделей для коэффициента силы трения и толщины вытеснения пограничного слоя. В некоторой области изменения характерного угла отклонения потока, стреловидности передних кромок звездообразных тел и при отсутствии скачков уплотнения в ударном слое или их интенсивности, недостаточной для отрыва пограничного слоя, модель расчета обеспечивает получение значений аэродинамического сопротивления

с точностью, соответствующей погрешности экспериментальных измерений, и может быть использована при оптимизации формы тел указанного класса при гиперзвуковых скоростях обтекания.

Козловский В. А., Лапыгин В. И., Липницкий Ю. М. *Некоторые аспекты образования вихревой пелены и ее влияние на аэродинамику тел большого удлинения.*

Представлены результаты исследований особенностей аэродинамики тел большого удлинения с крестообразным оперением, летящих под углом атаки α от 0 до 35° , при числах $M_\infty = 0,6-4,0$ и $ReD_\infty = (0,47-2,3) \cdot 10^6$. Экспериментально при $\alpha = 0-20^\circ$ получены зависимости для определения величины циркулирующих вихрей, осевой координаты их отрыва от вихревой пелены и местного угла атаки в зоне расположения подветренного стабилизатора в условиях турбулентного и переходного состояний пограничного слоя. Показано, что влияние вихревой пелены на аэродинамику оперения может быть рассчитано в результате использования метода Годунова для определения течения у наветренных стабилизаторов и разработанной методики для течения у подветренной консоли.

Швец А. И. *Волнолеты.*

В связи с проблемой создания гиперзвукового самолета активно развиваются исследования обтекания несущих конфигураций — волнолетов, построенных на основе поверхностей тока за скачками уплотнения произвольной формы. Если в прежние годы основное внимание уделялось нахождению оптимальных форм несущих поверхностей, то в последнее время изучаются компоновки самолетов с двигателями для заданных габаритов, весовых нагрузок, высот полета и температур поверхностей. Разработаны новые прямые и обратные методы расчета сверхзвукового обтекания волнолетов. В США, Англии, Германии изучаются возможности применения волнолетов для межконтинентальных полетов и в качестве первой ступени для вывода космического корабля на орбиту, рассматриваются экономические показатели, проблемы конструирования фюзеляжа, выбора двигателей, топлива и т. д.

Крайко А. Н., Пудовиков Д. Е. *Плоские головные части минимального волнового сопротивления в сверхзвуковом потоке идеального газа.*

Рассмотрена задача профилирования контура головной части плоского тела заданных габаритов, который реализует минимум волнового сопротивления в сверхзвуковом потоке идеального газа. Согласно выполненным ранее исследованиям, в той части плоскости $V_\infty \tau$ (V_∞ — безразмерная скорость набегающего потока, τ — относительная толщина тела), в которой искомый контур обтекается с присоединенной ударной волной, он близок к отрезку прямой. Использование этого обстоятельства позволило найти главную поправку к прямолинейной образующей в явном виде и представить характеристики практически оптимальных головных частей в форме изолиний в плоскости $V_\infty \tau$. Кроме того, показано, что клин — тело минимального сопротивления не только при нулевом коэффициенте отражения λ возмущений давления от возникающего при его обтекании косоугольного скачка, но и тогда, когда при $\lambda \neq 0$ поток за косым скачком звуковой.

Фонарев А. С., Найда М. А. *Эффективный метод расчета волнового сопротивления осесимметричных тел в околозвуковом диапазоне скоростей.*

Разработан новый эффективный метод определения волнового сопротивления тел вращения в трансзвуковом потоке идеального газа на основе интегральной теоремы импульсов. Рассмотрены случаи как стационарного, так и нестационарного потока с резкими аperiodическими изменениями параметров (внезапные порывы ветра, приходящие ударные волны и т. д.). Метод применен для расчета волнового сопротивления тел вращения различной формы, а также схематизированного гиперзвукового летательного аппарата в рамках трансзвукового правила эквивалентности.

Величко С. Я. *Метод решения задачи трансзвукового обтекания крылового профиля с развитыми зонами отрыва.*

Для расчета обтекания профиля при больших углах атаки в диапазоне дозвуковых и трансзвуковых режимов предлагается устойчивая и эффективная итерационная процедура решения задачи взаимодействия невязкого потенциального потока с турбулентным пограничным слоем и следом. Краевое условие внешней задачи представляет собой линейное соотношение между нормальной составляющей скорости, продольной составляющей и ее производной. При записи краевого условия внешней задачи и уравнений пограничного слоя в интегральном представлении используется с некоторым весом

условие взаимодействия. Уравнения эжекционного метода дополняются соотношениями, полученными с помощью трехпараметрического профиля скорости. Во внешней области течения использована модель потенциального обтекания, предложенная и реализованная Ю. Б. Лифшицем и А. А. Шагаевым. Учет неравновесности путем введения дополнительного параметра в профиле скорости позволяет получать для режимов отрывного обтекания за скачком уплотнения хорошо согласующиеся с данными опытов распределения давления, которые оказываются не хуже, чем результаты решения уравнений Навье — Стокса с наиболее точными для данного класса течений моделями замыкания.

Чернов И. А. Параметрическое представление точных решений трансзвуковых уравнений.

Обсужден метод, в котором как зависимые (u, v), так и независимые (x, y) переменные представляются в виде полиномов или дробно-рациональных функций одного параметра с коэффициентами, зависящими от другого параметра. В качестве примера рассмотрен профиль Гудерля — пример симметричного обтекания конечного тела звуковым на бесконечности потоком. Построен осесимметричный аналог профиля Гудерля.

Лифшиц Ю. Б. Влияние стенок аэродинамической трубы и трансзвуковой закон стабилизации.

Обсуждены некоторые результаты исследования влияния стенок трубы на обтекание профиля, полученные как при помощи численного моделирования, так и методами асимптотического анализа. Численные данные позволяют оценить область применимости дозвуковой концепции коррекции трубного эксперимента. Она заключается в сопоставлении с обтеканием того же профиля безграничным потоком под другим углом атаки и с измененным числом Маха. Это правило перестает действовать, начиная с режимов, соответствующих максимальному качеству. Асимптотический метод сингулярных возмущений применяется для выяснения влияния степени проницаемости стенок на стабилизацию потока перед скачком уплотнения. Полученные оценки свидетельствуют о слабом воздействии этого параметра.

Берлянд А. Т. Структура энтропийных слоев при торможении сверхзвукового потока в канале.

В работе Лина (AIAA 93-1838) приводится анализ методами CFD отрывного течения, предшествующего образованию псевдоскачка. Невязкий расчет этого течения до первого маховского скачка показал хорошее соответствие с данными Лина. Далее невязкая задача некорректна (используется численная схема АВР без диссипации). Анализ невязкого течения в плоском воздухозаборнике показал наличие около его стенок энтропийных слоев, близких по структуре к течению, рассмотренному Лином, что позволяет предположить возможность формирования полуткрытых течений типа псевдоскачка в этой области.

Бунимович А. И., Дубинский А. В. О задачах моделирования движения тел в различных средах и оптимизации формы проникающих тел в теории локального взаимодействия.

Предложена обобщенная «локальная» модель, описывающая воздействие среды на движущееся в ней и проникающее в нее тело. Получена формула, определяющая глубину проникания тела заданной формы. Даны постановки задач оптимизации формы проникающих тел. Показано, что в классе пространственных конических тел с геометрически подобными поперечными сечениями и заданным объемом на максимальную глубину проникают тела, имеющие минимальное сопротивление при движении в той же среде с постоянной скоростью.

Остапенко Н. А. Об асимптотическом решении задачи входа тонкого пространственного тела в сжимаемую жидкость.

Изложена методика построения равномерно пригодного решения в окрестности передних кромок тонкого пространственного тела, проникающего в сжимаемую жидкость. Областью неоднородности внешнего решения является «трубка» с некоторым поперечным масштабом. Показано, что внутренняя задача сводится к решению двумерного уравнения Лапласа для внутреннего потенциала в плоскости, нормальной к передней кромке в некоторой ее точке, с условием Римана — Гильберта на гранях «клина», образующего кромку в окрестности рассматриваемой точки. Приведены примеры построения равномерно пригодных решений для некоторых режимов входа с постоянной скоростью тонких конических тел с ромбовидным поперечным профилем. Найдены формулы для давления на передних кромках. Рассмотрены особенности построения равномерно пригодного решения для входа тонкого пространственного циклически-симметричного тела. Для определения давления на передней кромке

циклически-симметричного тела в областях взаимного влияния циклов достаточно просуммировать давление на кромке, вычисленное в основной задаче входа одиночного цикла с использованием равномерно пригодного решения и нелинейного интеграла Коши — Лагранжа, и возмущения давления, привносимые в данную точку остальными циклами тела и вычисленные на основе линейного решения.

Остапенко Н. А., Якунина Г. Е. *Оптимальные формы пространственных тел и их динамика в плотных средах.*

На основе анализа существующих теоретических и эмпирических моделей силового взаимодействия на поверхности контакта плотных сред и проникающего тела показана возможность использования модели локального взаимодействия для поиска оптимальной формы пространственных проникателей. Поставлена и решена аналитически для тонких тел и численно для толстых тел вариационная задача максимизации функционала глубины проникания при различных изопериметрических и краевых условиях. Исследованы особенности движения пространственных тел в плотных средах при различных начальных условиях входа. Изучено влияние на динамику тела факторов, учитывающихся в модели взаимодействия: трения, движения тела около центра масс.

Пилюгин Н. Н., Талипов Р. Ф., Хлебников В. С. *Исследования сверхзвукового обтекания тел неравномерными потоками.*

Дан обзор экспериментальных и теоретических исследований, проведенных авторами по силовому и тепловому воздействию неравномерных сверхзвуковых потоков на летящие тела. При кососимметричном расположении таких тел, как диск, полость, затупленный конус, в следе за телом наблюдается нестационарный режим течения с пульсациями отрывной зоны, гистерезисные явления. Определены зависимости критического расстояния прямой и обратной перестройки течения между парой тел от сопротивления переднего тела, размеров и формы тел, проницаемости заднего тела, от способов соединения, а также от чисел M и Re . Определены зоны действия и величины максимальных значений давления и теплового потока. В рамках уравнений полного ударного слоя выполнены расчеты аэродинамических характеристик и теплообмена затупленных тел (сфера, параболоид, гиперболоид, конус) в широком диапазоне чисел M и Re в неравномерном набегающем потоке и при вдуве с поверхности. Определены критические значения параметров неравномерности для условий отрыва в зависимости от чисел M и Re .

Гувернюк С. В., Савинов К. Г., Самойлов А. Б. *Особенности взаимодействия тел с неоднородными газовыми потоками.*

Установившееся обтекание затупленного тела с ударным слоем без рециркуляции существует лишь при достаточно жестких ограничениях на диапазон изменения параметров, определяющих сдвиговую, тепловую или кинематическую неоднородности сверхзвукового набегающего потока идеального газа. Нарушение этих условий приводит либо к возникновению автоколебаний ударного слоя, либо к появлению зон рециркуляции. Для течений с минимумом числа Маха на оси симметрии построен класс обтекаемых без рециркуляции предельных тел максимального лобового сопротивления с головной частью в форме затупленных конусов. Для течений с максимумом числа Маха на оси симметрии воспроизведен численно автоколебательный режим взаимодействия и исследован характер затухания вынужденных возмущений установившегося обтекания вблизи границы перехода к режиму автоколебаний.

Черкашин В. А. *Численное моделирование отрывных течений.*

Изложен метод расчета сверхзвукового обтекания тел сложной формы с учетом возникновения зон отрыва. Для нахождения решения используется зональный подход, основанный на решении стационарных и нестационарных уравнений Эйлера. Исследовано два вида отрывных течений с фиксированной и не фиксированной точкой отрыва на гладкой поверхности, в том числе и с учетом неравномерного энергоснабжения.

Минайло А. Н., Чернов С. В. *Сверхзвуковая аэродинамика тела конус-цилиндр при малых углах атаки.*

На основе метода Мак-Кормака для $2 \leq M \leq 10$ определены аэродинамические характеристики тела для угла полураствора конуса от 3 до 15° и удлинения $\lambda = L/d \leq 35$.

Обнаружены экстремумы и нелинейности поведения характеристик. Вязкость существенно влияет на аэродинамику, поэтому для получения чисто невязких частей характеристик нельзя применять

конечно-разностные схемы первого порядка. Так расчеты по методу Годунова показали, что характеристики сходятся по сеткам к другим значениям, чем результаты, полученные методом Мак-Кормака.

Еремин В. В., Михалин В. А., Родионов А. В. *Построение расчетных сеток и расчет сверхзвукового стационарного обтекания тел сложной геометрической формы.*

Для построения вычислительных сеток в областях со сложными границами используются модификации параболического генератора сеток, в которых на этапе предиктора отказываются от фиксированного распределения узлов сетки на внешней границе тела. При этом для описания границ области используются локальные полиномы третьего порядка. Для интегрирования уравнений Эйлера используется модификация метода Годунова, имеющая второй порядок аппроксимации по всем координатам, обладающая свойством монотонности и усовершенствованная для расчета на неравномерной сетке без потери аппроксимации. Приводятся примеры расчета сверхзвукового стационарного обтекания острых эллиптических конусов с эллиптичностью до 50, космического самолета типа «Гермес», сверхзвуковой интерференции двух цилиндроконических тел при их различном положении друг относительно друга, расчета процесса разделения ступеней ракеты-носителя, имеющих цилиндроконическую конфигурацию, а также компоновки перспективного многоразового космического корабля, состоящей из двух блоков с развитыми крыльями.

Власенко В. В. *Численное моделирование течений с горением водорода в наклонных детонационных волнах.*

Описан численный метод для моделирования химически неравновесных течений. Приводятся примеры расчета наклонных детонационных волн около клина на пластине для невязкого газа; для вязкого газа — с учетом ламинарного пограничного слоя с образованием отрыва; установлено, что из-за вытесняющего действия отрывной зоны детонационная волна образуется не раньше, а позже, чем в невязком случае. Сравнение расчета для случая взаимодействия турбулентной струи с клином без учета пограничного слоя с невязким расчетом показывает, что влияние турбулентности незначительно.

Прудников А. Г., Иванов Ю. А., Третьяков П. К. *Экспериментальное исследование моделей ГПВРД с диффузионным горением твердого топлива в сверхзвуковом потоке.*

На трех присоединенных к воздухопроводу моделях камер проведено исследование: торможения сверхзвукового потока в бесплопвой камере продуктами горения твердого топлива; комбинированного торможения трансзвукового потока за уступом; торможения с последующим разгоном потоков в двух коаксиальных цилиндрах. Испытания показали: возможность практического торможения и разгона сверхзвукового или трансзвукового потока в расширяющейся уступом или монотонно камере с помощью подвода нагретой массы, тепла или их комбинации; в частности, без воздухозаборных устройств, только за счет организованного естественного перетекания реализовано «тепловое сопло» с максимальным торможением сверхзвукового потока.

Глаголев А. И., Зубков А. И., Третьяков П. К. *Влияние теплопроводности на донное сопротивление тел вращения при сверхзвуковом обтекании.*

Представлены результаты экспериментальных исследований возможностей снижения донного сопротивления тел вращения, движущихся со сверхзвуковой скоростью, при вдуве продуктов неполного сгорания пиротехнических составов. На основании анализа и обобщения большого объема экспериментальной информации установлены режимы течения в донной области. Найдены зависимости увеличения донного давления и снижения донного сопротивления от основных параметров потока, формы тела вращения и параметров вдува. Рассмотрены различные способы и схемы вдува продуктов неполного сгорания пиротехнических составов в ближний след, позволяющие существенно повысить эффективность вдува для целей снижения донного сопротивления.

Балашов М. В., Емельянов В. Н. *Увеличение теплопровода в ближний след при горении пиротехнических магнелевых составов.*

Рассмотрен механизм горения пиротехнических составов на основе магния с $L_0 = 1,5-1,8$ в условиях ближнего следа. До 80% частиц магния, поступающих в зону ближнего следа, догорает за его пределами и при этом не оказывает влияния на уменьшение донного сопротивления. Предложен способ модификации частиц магния, заключающийся в химическом покрытии магния никелем,

причем содержание никеля по массе составляет 8—10%. При этом в ближний след до 90% магния поступает в парогазовой фазе, которая полностью догорает в зоне рециркуляции и смешения. В результате глйд от использования в качестве топлива для снижения донного сопротивления пиротехнических составов повышен на 60%.

Зубков А. И., Кузнецов О. М., Панов Ю. А. *Вихри за клином в сверхзвуковом потоке на плоской поверхности.*

Экспериментально при числе $M = 2,9$ изучена структура течения за вертикальным клином, расположенным на плоской поверхности с турбулентным пограничным слоем. Обнаружено, что в зависимости от угла α отклонения клина от направления набегающего потока ($0 \leq \alpha \leq 45^\circ$) за клином образуется от 1 до 4 пар вихревых жгутов различного поперечного размера.

Виноградов Ю. А., Зубков А. И., Панов Ю. А. *Структура течения вблизи двух последовательно расположенных препятствий, обтекаемых сверхзвуковым потоком.*

Экспериментально изучена структура течения вблизи двух вертикальных цилиндров, расположенных друг за другом на плоской поверхности с турбулентным пограничным слоем и обтекаемых сверхзвуковым потоком с числами Маха от 1,75 до 3,5. В зависимости от расстояния между цилиндрами возникает шесть характерных режимов течения, обусловленных взаимодействием ударных волн с пограничным слоем и возникновением различных областей пространственных отрывных течений.

Штеменко Л. С., Шугаев Ф. В., Бурова Е. В., Буряк Ю. Б. *Нестационарное течение газа около затупленного тела с иглами.*

Исследовано нестационарное сверхзвуковое течение фреона-12 около цилиндра с плоским торцом и иглами в лобовой части. Число игл варьировалось от одной до семи, длина — от одного диаметра цилиндра до двух. Опыты проведены в ударной трубе. Число Маха потока, набегающего на тело, менялось от 1,8 до 3. Иглы формировали турбулентную отрывную зону перед цилиндром. На квазистационарной стадии течения локальное давление на лобовой части тела оказалось значительно больше давления за фронтом ударной волны, образующейся около турбулентной области отрыва. Применение нескольких игл с одной центральной привело к уменьшению пульсаций давления на лобовой части цилиндра.

Гущин Н. И., Ермаков В. В., Кашин В. М., Рютин В. Б. *Особенности аэродинамики малоразмерных удлиненных оперенных тел.*

На основе многолетнего опыта обобщены и рассмотрены проблемы расчетно-теоретической и экспериментальной обработки аэродинамических характеристик малоразмерных удлиненных ($\lambda = 20, \dots, 30$) тел вращения типа «крыло + крестообразное оперение» в до-, транс- и сверхзвуковых потоках ($M \leq 6$). Известные численные методы, включая и полуэмпирические, содержащие, как правило, экспериментальные поправки, с точки зрения обеспечения точности не дают удовлетворительного решения. Экспериментальная обработка таких тел показала, что для получения требуемого объема информации необходимо реализовать целый комплекс различных испытаний — от стендовых (в аэродинамических трубах и аэробаллистических трассах) до натуральных. Отмечено заметное влияние на аэродинамические и аэробаллистические характеристики малоразмерных тел технологических допусков на закладываемые геометрические размеры. Например, разброс коэффициента аэродинамической продольной силы C_x с учетом реальной геометрии тела достигает 15—20% среднего уровня.

Стекиениус К. А. *Экспериментальное исследование влияния вязкости на аэродинамические характеристики сегментально-конических тел при сверхзвуковых скоростях.*

Экспериментально подтверждено, что в качестве характерного критерия подобия по вязкости следует применять число Рейнольдса Re , вычисленное по параметрам газа за головной ударной волной и диаметру тела. Течение на лобовом сегменте при $M \geq 3$ не зависит от числа Рейнольдса для $10^2 \leq Re \leq 10^6$, а давление на обратном конусе — при $Re \geq 4 \cdot 10^5$. Давление в наветренной отрывной зоне на обратном конусе увеличивается с понижением числа Re , а ее протяженность может как возрастать, так и падать в зависимости от числа M и угла атаки. В связи с этим давление в области безотрывного обтекания конуса может также как падать, так и существенно увеличиваться с понижением числа Re . Характер изменения давления на обратном конусе зависит от состояния

пограничного слоя, стекающего с сегмента. Изменение давления на обратном конусе в зависимости от числа Re заметно отражается на величине аэродинамического качества при больших углах атаки. Аэродинамическое качество значительно падает с уменьшением числа Re , что в основном обусловлено увеличением напряжений трения.

Глазков Ю. В., Сахаров В. И., Талипов Р. Ф. *Сравнение численных решений уравнений Навье — Стокса и их приближенных моделей.*

Численно исследовано сверхзвуковое обтекание затупленных двумерных тел в рамках различных газодинамических моделей. Метод решения параболизированных уравнений Навье — Стокса и полного вязкого ударного слоя основан на проведении глобальных итераций по градиенту давления в направлении маршевой координаты. Для второй модели необходимо добавить глобальные итерации по форме головной ударной волны. При интегрировании уравнений Навье — Стокса применялась неявная TVD-схема и принцип установления по времени. Выяснено, что различие профилей искомых функций для разных моделей зависит от локального числа Рейнольдса Re . При фиксированном Re_∞ увеличение M_∞ приводит к уменьшению Re и увеличению отличия решений. Тепловой поток и трение на поверхности обтекаемого тела слабо зависят от выбранной модели уравнений.

Брыкина И. Г., Сахаров В. И. *Приближенный метод расчета тепловых потоков к поверхности затупленных тел, обтекаемых сверхзвуковым и гиперзвуковым потоками газа в рамках уравнений Навье — Стокса.*

Исследуется осесимметричное обтекание затупленных тел сверхзвуковым потоком вязкого совершенного газа в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха. Получено приближенное аналитическое решение для распределения вдоль поверхности тел тепловых потоков, отнесенных к их значению в точке торможения. Выражение для относительного теплового потока зависит только от геометрии обтекаемого тела и распределения давления вдоль его поверхности. Для оценки точности и области применимости формул проведено сравнение с полученными в работе численными решениями полных уравнений Навье — Стокса для тел различной формы (сфера, эллипсоиды, параболоид).

Гимранов Э. Г., Михайлов В. Г. *Расчет параметров вязкого сверхзвукового потока в каналах двигателей летательных аппаратов.*

В условиях внутренней задачи рассматриваются проблемы сильного взаимодействия вязких диссипативных слоев с внешним невязким сверхзвуковым потоком в сложной волновой газодинамической структуре, получившей название «псевдоскачок». В рамках интегральных методов расчета предложена математическая модель псевдоскачка, позволяющая описать профили скорости в областях перехода от невозмущенного течения к течению с продольным градиентом давления и от градиентного течения к изобарическому, т. е. соответствующих началу и концу псевдоскачка. Приведено сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными данными других авторов.

Исаев С. А., Судаков А. Г., Сумовский Н. А. *Моделирование пространственных вихревых структур с учетом турбулентности, криволинейности и проницаемости обтекаемых тел.*

Численное исследование крупномасштабных вихревых структур, организованных при осесимметричном обтекании тел с соосными дисками, позволило выявить механизм существенного (более чем на порядок) снижения профильного сопротивления затупленных тел. Расчетный алгоритм, основанный на решении уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью двухпараметрической диссипативной модели турбулентности, тестируется на задачах о циркуляционном движении жидкости в каверне, об отрывном обтекании уступа, цилиндра, диска, системы дисков.

Ковалев В. Л., Крупнов А. А. *Численное исследование турбулентного течения частично ионизованного воздуха в вязком ударном слое.*

В рамках модели полного вязкого ударного слоя разработан эффективный метод расчета ламинарных и турбулентных течений химически реагирующей частично ионизованной смеси газов около длинных затупленных конусов с малыми углами полураствора. Точность метода подтверждена сравнением с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов. Определены при турбулентном и ламинарном режимах течения величины конвективных тепловых потоков к поверхности, уровень ионизации в ударном слое, отход ударной волны и другие характеристики.

Сычев В. В. *Асимптотическая теория течений типа торнадо.*

Разработана новая теоретическая модель течения типа торнадо, основанная на асимптотическом анализе поля течения при больших числах Рейнольдса. Важнейшим ее элементом является новое точное (автомодельное) решение для невязкой области, удовлетворяющее условиям сращения с течением в вязком ядре и пограничном слое на твердой поверхности.

Шкадов В. Я., Шкадова В. П. *О гидродинамической теории нанесения тонкослойных покрытий на движущуюся поверхность.*

Рассматривается формирование жидкой пленки на тонком цилиндрическом теле при извлечении его из объема, заполненного жидкостью. Показаны возможности новой гидродинамической теории, в которой учитывается влияние конвективных членов в уравнениях Навье — Стокса. Решение строится в двух областях, после чего корректная процедура склеивания позволяет построить непрерывное решение с непрерывными производными. Решение легко обобщается на случай движения плоской поверхности. Расчеты толщины слоя и формы свободной поверхности согласуются с экспериментальными данными до значений капиллярных чисел порядка 10^{-1} . Обсуждены постановки задач о неустойчивости формирующихся слоев и о возможностях решения задачи при увеличении капиллярного числа до значений порядка единицы.

Герценштейн С. Я., Ромашова Н. Б., Сухоруков А. Н. *О трехмерной неустойчивости в невязких течениях.*

Особное внимание уделено исследованию трехмерных механизмов неустойчивости течений, формирующихся в зоне перехода от ламинарного режима движения к турбулентному. В ряде случаев трехмерные механизмы являются определяющими, особенно при наличии в гидродинамической системе жесткого возбуждения. При этом механизмы неустойчивости могут качественно отличаться от линейного и двумерного нелинейного случаев, иметь существенно другие амплитуды, масштабы, частоты и пр. Работа выполнена в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости. В линейной задаче для трехмерного течения исследована алгебраическая неустойчивость. В нелинейной задаче при помощи модифицированного метода Рэлея исследовано нелинейное взаимодействие трехмерных возмущений в плоских градиентных течениях. Выявлен разностный резонанс, приводящий к интенсивному развитию поперечных трехмерных возмущений.

Беляев Ю. Н. *О возможности однозначной идентификации хаотических режимов течений вязкой жидкости в замкнутых объемах.*

На примере течения между двумя вращающимися сферами экспериментально изучены дальнейшие бифуркации хаотических режимов после возникновения хаоса. Показано, что при размерностях хаотических аттракторов $D_H < 7$ возможна однозначная классификация хаотических режимов на основе оценок размерностей с привлечением качественной информации о грубой структуре течения. Наиболее эффективными при оценках D_H оказываются корреляционные методы, основанные на построении базиса Карунена — Лоева, позволяющие выделять медленную хаотическую динамику на аттракторе на фоне сравнительно высокочастотного экспериментального шума в условиях недостатка информации.

Никитин Н. В. *Прямое численное моделирование турбулентности и перехода в трубах.*

Эффективный вычислительный алгоритм решения трехмерных уравнений Навье — Стокса применяется для исследования турбулентных течений в трубах кругового сечения. Рассмотрены две постановки задачи: с условием и без условия периодичности течения в осевом направлении.

В первой постановке получены статистически стационарные движения при числах Рейнольдса от 2250 до 10 000. Рассчитанные статистические моменты 1-го и 2-го порядка хорошо согласуются с экспериментальными данными. В частности, экспериментальный закон сопротивления воспроизведен с 2—3%-ной точностью. При наибольших числах Рейнольдса получен логарифмический слой в профиле средней скорости с константой Кармана, близкой к экспериментальному значению 0,4. Во второй постановке задачи изучено пространственное развитие периодических по времени возмущений, вносимых в течение Пуазейля в фиксированном сечении трубы. Расчеты проводились при $Re = 4000$. Обнаружено, что низкочастотные входные возмущения с начальной амплитудой около 1% от максимальной скорости течения ведут к значительному угловому искажению основного потока. На фоне

такого искажения возникают высокочастотные турбулентные пульсации, дальнейшее развитие которых вниз по потоку ведет к формированию развитого турбулентного движения.

Лущик В. Г., Якубенко А. Е. *Дифференциальная модель турбулентности: численное исследование смешанной конвекции в вертикальных трубах.*

Выполнено обобщение трехпараметрической модели турбулентности, дополненной уравнением переноса для поперечного турбулентного потока тепла, на течение в вертикальных обогреваемых трубах при наличии силы тяжести, совпадающей по направлению с осью трубы. Для продольного турбулентного потока тепла предложено алгебраическое соотношение, константа в котором определена из экспериментов по вырождению турбулентности за нагреваемыми решетками. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по числу Нуссельта, полям скорости и температуры, профилям турбулентного трения и поперечного потока тепла. Результаты расчета в качественном отношении согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Количественное соответствие имеет место не для всех экспериментов.

Некрасов И. В. *Моделирование распространения примеси в двумерных долинах.*

Описываются результаты аэродинамических экспериментов и математического моделирования процесса диффузии примеси в двумерных долинах, обтекаемых турбулентным потоком типа приземного слоя атмосферы. Исследовались три модели долины с малой, умеренной и большой крутизной склонов. Приведены результаты измерений средних и пульсационных характеристик поля скорости, а также распределения концентраций примеси для непрерывного точечного источника различной высоты, расположенного на разном удалении от оси долины. Эти данные сравниваются с результатами расчетов по математической модели, использующей численное решение уравнения диффузии, для которого поля скоростей и коэффициента вихревой вязкости определялись по результатам аэродинамических экспериментов. Рассчитанные поля концентрации примеси оказались в хорошем согласии с измеренными для долины малого наклона и в худшем согласии для среднего наклона.

Мельник О. Э. *Моделирование нестационарных явлений динамики извержения сильновязких газонасыщенных магм.*

Извержения сильновязких газонасыщенных магм (вулканы Везувий, Тамбора, Кракатау, Толбачик и др.) часто носят катастрофический характер. Их характеризует большой перепад давления, так что по мере подъема магмы из очага структура потока изменяется от гомогенной до газозвеси, а также аномально большая вязкость, препятствующая образованию газовых снарядов, характерных для пароводяных и нефтегазовых смесей. Построена нестационарная модель процесса с выделением двух зон: пузырьковой и газозвеси, в каждой из которых течение описывается своей системой уравнений. Исследована реакция системы на возмущения стационарного решения различного типа. Показано, в частности, что скачок давления в очаге порождает интенсивное колебание расхода в жерле.

Очеретяный С. А., Прокофьев В. В. *Инициация кавитации путем поддува горячего пара в струю холодной жидкости.*

Рассматривается задача об инициации кавитирующей струи путем поддува горячего пара в область повышенного давления, организованную на выходе из сопла. Исследуется динамика сферического конденсирующегося пузыря в неравномерном поле течения струи жидкости. Тепловая задача решается с учетом неравновесной конденсации в приближении равномерности давления пара в пузыре. Обнаружено два режима инициации кавитационных пузырей — монотонного инерционного роста и осцилляции с возрастающей амплитудой. Проведены расчеты с учетом конденсации переохлажденного пара внутри пузыря. Подбирая давление в зоне инъекции пузырей, можно обеспечить высокую эффективность инициации кавитации при сравнительно низких давлениях напора струи (35 кгс/см).

Синицина Н. Н. *Учет гидродинамического взаимодействия в процессе осаждения многокомпонентных смесей.*

Для прикладных задач океанологии — перемещения осадка, газозвесей и зоо-, фитопланктона и для промышленных задач с суспензиями, коллоидами, взвешенными слоями выполнено численное исследование седиментации ансамблей твердых частиц различной пространственной конфигурации

в неограниченной жидкости. Графически выявлены когерентные структуры в цилиндрических системах осаждающихся частиц, найдены области необходимости учета гидродинамического взаимодействия частиц, в частном случае определен коэффициент турбулентной диффузии примеси.

Любимов Г. А., Скобелева И. М. *Математическая модель форсированного выхода.*

В клинической практике при оценке функционального состояния дыхательной системы человека широко используют тест, называемый пробой форсированного выдоха: испытуемый делает максимальный вдох, немного задерживает дыхание, а затем производит быстрый полный выдох с максимально возможным усилием. В процессе форсированного выдоха регистрируются текущие значения объемной скорости воздуха у рта испытуемого V' и объема выдохнутого газа V . Вид кривой $V' = V'(V)$, называемой кривой поток — объем, служит основой для диагностики легочных заболеваний. Однако на сегодня нет четкого представления о том, какие физические процессы определяют качественный вид этой кривой. Разработана однокомпонентная модель легких, пригодная для описания механики форсированного выдоха, которая в отличие от имеющихся в литературе удовлетворительно описывает всю совокупность известных опытных факторов и может служить аппаратом для исследования влияния физических свойств легких и дыхательных путей на вид кривой поток — объем форсированного выдоха.

Гогосов В. В. *Об основных направлениях развития работ по магнитным жидкостям.*

Обсуждены свойства магнитных жидкостей и их применение в различных технических устройствах. Особое внимание уделено магнитожидкостным уплотнителям, магнитожидкостным сепараторам и демпферам, а также применению магнитных жидкостей в медицине для направленного транспорта лекарств. Изложены основные принципы работы магнитожидкостных устройств. Описаны новые физические и гидродинамические явления, происходящие в магнитных жидкостях при наложении магнитного поля. Отмечены основные направления исследований при изучении этих явлений.

Бармин А. А., Мельник О. Э., Прищепенко А. Б. *Исследование распространения сильной ударной волны в монокристалле при наличии магнитного поля.*

При схлопывании сильной цилиндрической ударной волны в монокристалле галогенида щелочного металла за фронтом образуется жидкая электропроводящая среда, которая взаимодействует с приложенным (аксиальным) магнитным полем. В результате конкуренции процессов усиления волны при ее схождении к оси и торможении ее полем, в зависимости от значения определяющих параметров возможны различные режимы. Волна может остановиться на конечном радиусе, дойти до оси (бесконечная комуляция), а также двигаться, то ускоряясь, то замедляясь. В последнем режиме возможно резкое изменение магнитного поля в неразрушенной части кристалла, что приводит к сильному электромагнитному излучению, наблюдавшемуся в эксперименте.

Баранов В. Б., Бармин А. А., Пушкарь Е. А. *Магнитогидродинамическая модель столкновения ударных волн в окрестности гелиопаузы.*

На основе двумерной МГД-модели взаимодействия сильных разрывов и модели обтекания солнечной системы межзвездной средой с учетом процессов перезарядки показана возможность образования областей с 7—8-кратным превышением плотности в результате падения ударной волны, идущей от Солнца, с предельной ударной волной в окрестности гелиопаузы. При этом такие области возникают на флангах предельной волны, где существенен неоднородный МГД-характер рассматриваемых процессов. Согласно представлениям геофизиков, ударное образование таких областей является причиной резкого повышения радиоизлучения на частоте 2 кГц, которое наблюдалось с 06.1992 по 02.1993 на космических кораблях.

Пушкарь Е. А. *Догонное взаимодействие ударных волн в проводящей среде с магнитным полем.*

В рамках модели идеальной магнитной гидродинамики детально исследовано регулярное взаимодействие двух плоских фронтов МГД быстрых ударных волн, догоняющих одна другую под произвольным углом с магнитным полем. При непрерывном изменении определяющих параметров волновая картина течения и его характеристики могут изменяться скачкообразно. При обращении в нуль собственного электрического поля в зависимости от его начального направления магнитное поле в возникающем течении может многократно усиливаться или ослабляться. Напряженность

магнитного поля существенно влияет на течение и его газодинамические характеристики. В частности, он выделяет направление, при распространении по которому лидирующая ударная волна ускоряется сильнее.

Сазонова В. Н. Взаимодействия магнитогидродинамических ударных волн с тангенциальными разрывами.

Построены регулярные решения автомодельных задач о взаимодействии быстрых и медленных ударных волн с тангенциальными разрывами, т. е. разрывами, на которых нормальные к поверхности составляющие скорости и магнитного поля равны нулю. Найдены ограничения на начальные параметры, необходимые для существования регулярного решения. Определены различные возможные волновые картины течений и построены границы между ними в пространстве определяющих параметров. Выяснены основные особенности возникающих течений и зависимость их от начальных данных. Одно из приложений данной задачи — исследования различных явлений в дальнем и ближнем космосе, в частности задача о взаимодействии тангенциальных разрывов, переносимых солнечным ветром, с головной ударной волной Земли, задача о падении возмущений солнечного ветра на магнитопаузу, исследование корональных солнечных возмущений.

Налетова В. А., Турков В. А. Растекание намагничивающейся жидкости по поверхности горизонтального вращающегося диска в неоднородном магнитном поле.

Исследуется гидродинамика вязкой намагничивающейся жидкости, подающейся на вращающийся диск в присутствии произвольного неоднородного магнитного поля. Задача решается в стационарном и в нестационарном случае для достаточно тонких слоев. Показано, что магнитное поле может влиять на форму поверхности. Найдено условие, накладываемое на магнитное поле, при котором стационарная поверхность горизонтальна.

Румынский А. А. К вопросу о способах повышения эффективности сжигания природных топлив при уменьшении вредных выбросов в атмосферу.

Рассмотрены способы уменьшения выброса оксидов азота в атмосферу при сжигании природных топлив в энергетических установках. Показаны их достоинства и недостатки. Предложена технология снижения оксидов азота на основе метода сжигания топлива с локальным дозированным впрыском влаги в зону горения. Приведен расчетный анализ процессов сжигания топлив методом элементарной газовой струйки с эквивалентным диаметром, удовлетворительно описывающим физико-химические процессы в факеле. Проведены теоретические и экспериментальные исследования и последующая оптимизация ввода влаги в топку с точки зрения минимума потерь на теплообмен с максимумом снижения в выбросах оксидов азота.

Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Сепп В. А., Шульгин В. И. Влияние электрического поля на структуру пламени и эмиссию оксидов азота в диффузионных ламинарных углеводородных пламенах.

Выполнены две серии экспериментов. В первой изучалось непосредственное влияние продольного электрического поля на структуру и эмиссионные свойства ламинарного диффузионного пропанового пламени. Продемонстрировано существенное уменьшение эмиссии оксидов азота при подаче отрицательного напряжения на горелку (по индексу эмиссии — до 40%). Предложена причинно-следственная связь процессов в пламени: наличие в нем положительно заряженных ионов и частиц сажи; движение ионов в электрическом поле и возникновение индуцированного электрогидродинамического течения, направленного к отрицательной горелке; задержка и увеличение концентрации частиц сажи в нижней области пламени, что приводит к увеличению излучения частицами сажи и, следовательно, к уменьшению температуры фронта пламени и обусловленному этим уменьшению эмиссии оксидов азота. Во второй серии исследовалось влияние коронного разряда на процессы в движущихся по трубе продуктах сгорания (от углеводородного пламени). Показано уменьшение содержания окиси азота в потоке в случае отрицательного коронного разряда.

Панкратьева И. Л., Полянский В. А., Сахаров В. И., Файзуллин Р. Т. Исследование особенностей электрогидродинамического течения слабопроводящей жидкости в канале ЭГД-устройства.

Численно исследовано осесимметричное течение слабопроводящей жидкости в канале, геометрия которого типична для различных видов современных ЭГД-устройств. Используется модель униполярно заряженной среды, в которой объемный заряд возникает в результате инжекции ионов с поверхности

электрода, расположенного по оси канала. В сильном электрическом поле инжектируемые ионы образуют струю в виде полого конуса. Взаимодействие ионной струи с несущей жидкостью приводит к образованию в области течения вихрей и к существенно неоднородному распределению давления с минимумом в окрестности струи. Обсуждены кинематический и динамический механизмы, приводящие к повышению давления на выходе из канала по сравнению с входным.

Кривоносова О. Э., Лосев С. А., Шаталов О. П. *Анализ моделей констант скорости диссоциации в квазистационарных условиях за фронтом ударных волн.*

За фронтом ударной волны в молекулярном газе основное время (до 90%) диссоциация протекает в квазистационарных условиях, т. е. при неизменном запасе колебательной энергии. На примере диссоциации O_2 и N_2 в указанных выше условиях был проанализирован ряд моделей для константы скорости диссоциаций. Все рассматриваемые модели учитывают колебательно-поступательную неравновесность, и константа скорости является функцией двух температур: T и T_v . Анализ моделей состоял в расчете колебательной температуры диссоциирующего газа T_v как функции поступательной температуры T , далее найденное значение T_v использовалось для расчета константы скорости, которая в этом случае является функцией только поступательной температуры.

Малкин А. И. *Акустические солитоны в заполненных жидкостью упругих трубах.*

Эволюция акустических импульсов в заполненных сжимаемой жидкостью упругих трубах определяется конкуренцией между нелинейностью и дисперсией, обусловленной деформируемостью оболочки. В интересных с прикладной точки зрения задачах оба этих фактора могут рассматриваться как малое возмущение. Получено нелинейное интегродифференциальное уравнение, описывающее распространение акустических волн в таких системах, и рассмотрены свойства его солитонных решений. Установлено существование стационарных локализованных решений с дискретным и непрерывным спектром скоростей, гладких решений и решений с особенностями в профиле. Для солитонов дискретного спектра получены приближенные «правила квантования».

Терещенко В. А. *Биомеханика клетки.*

Проводились экспериментальные исследования изменения механических свойств материала поверхности амебодных клеток. Объектами экспериментов были модельные сферические клетки, получаемые из фрагментов плазмодия миксомицета. С помощью разработанного комплекса приборов установлены закономерности динамики процессов, протекающих в клеточном цикле на структурном уровне. По результатам исследований предложены математические модели клеточного деления и материала клеточной поверхности.