

УДК 531/534:061.3

© 1990 г.

**У ВСЕСОЮЗНОЕ СОВЕЩАНИЕ
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ»
(Рыбачье, 29 сентября – 8 октября 1989 г.)**

На совещании, ставшем традиционным, обсуждались актуальные проблемы, охватывающие широкий круг фундаментальных и прикладных задач, в которых основополагающую роль играет механика жидкости и газа. В представленных докладах рассматривались классические задачи аэродинамики о сопротивлении различных тел, новых конфигураций, явления турбулентного отрыва, различные течения двухфазных сред, а также новые задачи о проникании в твердое тело, особенности движения тела сложной формы под действием аэродинамических сил, задачи релятивистской и магнитной газодинамики. Большое внимание было уделено развитию и применению численных методов к решению сложных задач аэрогидродинамики (более 10 докладов). Необходимо подчеркнуть, что большое число исследований, рассмотренных на совещании ($1/3$ докладов), экспериментальные.

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

Черный Г. Г. (Москва). *Движение тела в твердой среде с аномально низким сопротивлением. Явление «сверхглубокого» проникания.*

При движении под нагрузкой твердого тела по поверхности другого тела или при внедрении одного тела в другое в области контакта тел вследствие их фрикционного разогрева может образоваться жидкая прослойка расплавленного материала. Рассмотрены две типичные задачи: движение полубесконечной пластины в твердой плавящейся среде и скольжение плавящегося бруса по плоской поверхности. Описано и объяснено новое явление «сверхглубокого» проникания твердых частиц из различных материалов в металлы (на глубину, в сотни и даже тысячи раз превышающую размер частиц). Предложена модель движения частицы. При данной начальной скорости частиц для ряда конкретных материалов оценена зависимость глубины проникания от размера частиц, согласующаяся с полученными экспериментальными данными.

Бунимович А. И. (Москва). *О центре давления проникающих тел.*

В ряде опубликованных работ были установлены свойства неизменности положения центра давления тел различной конфигурации при полете в атмосфере с большими скоростями. В докладе показано, что соответствующие результаты могут быть установлены и в задачах проникания тел с большими скоростями в деформируемые среды.

Якимов Ю. Л. (Москва). *Автомодельная «диффузия» импульса в идеальной жидкости.*

Рассмотрена плоская автомодельная задача, когда в покоящейся жидкости в точку мгновенно вносится конечный импульс. Показано, что существует течение с двумя симметричными свертывающимися вокруг особых точек и одновременно расширяющимися вихревыми ядрами. Результат сравнивается с автомодельным решением Б. А. Луговцова об автомодельной диффузии импульса жидкости со специальной вязкостью и его возможными обобщениями. Эти течения могут быть получены как результат суперпозиции задачи о диффузии вихревой нити в вязкой жидкости при любой зависимости вязкости от времени. В отличие от течения идеальной жидкости, соответствующего большим числам Рейнольдса, эти решения стремятся к точным только при числе Рейнольдса, стремящемся к нулю.

Гонор А. Л. (Москва), Забутная В. И. (Днепропетровск). *О форме кавитатора наименьшего сопротивления.*

В рамках схемы Рябушинского решена вариационная задача о форме кавитатора с заданным диаметром миделева сечения каверны, имеющего наименьшее сопротивление. Для расчета распределения давления на поверхности кавитатора используется формула локального типа. Поверхностное трение учитывается с помощью постоянного коэффициента локального трения. Расчет сопротивления полученных форм кавитаторов, отнесенного к площади миделя каверны, показал, что оно меньше соответствующих значений для диска и конуса на 10%. Приведены данные эксперимента по обтеканию моделей оптимальных кавитаторов и эквивалентного

по миделю каверны диска при $\sigma=0,05$. Сила сопротивления, измеренная с точностью до 10%, для обоих типов кавитаторов оказалась одинаковой.

Субханкулов Г. И., Хомяков А. Н. (Москва). *Применение метода граничных элементов к решению задачи об обтекании осесимметричных кавитаторов.*

Рассматривается течение идеальной несжимаемой жидкости с развитой кавитацией в трубе и в безграничной области. Для конических кавитаторов с углами полураствора $15^\circ \leq \alpha \leq 110^\circ$ определяются геометрические параметры каверн и силы, действующие на кавитатор. Показано, что конический кавитатор с углом полураствора $\alpha=66-67^\circ$ обладает наименьшим сопротивлением при фиксированном значении радиуса миделя каверны.

Коваль М. А., Сычев В. Б. (Харьков). *Обтекание цилиндра плоской пристенной струей.*

Экспериментально исследуется взаимодействие цилиндра с высокоскоростной плоской пристенной струей, сопоставимой по толщине с диаметром цилиндра. Наибольшее силовое воздействие наблюдается для некоторого промежуточного расположения цилиндра в струе. При непосредственном приближении цилиндра к экрану, вплоть до его касания, отталивающая сила несколько снижается. При касании струей цилиндра на нем реализуется притягивающая к экрану составляющая реакции. Исследования по взаимодействию струи с цилиндром выполнены на начальном, переходном и основном участках струи, параметры которой изучались предварительно.

Санжаревский Л. Г. (Харьков). *Замена плоского вихревого движения жидкости на границе области, частично примыкающей к поверхности обтекаемого тела, потенциальным в рамках теории исчезающей вязкости.*

Для обоснования однозначного выбора нетривиальных граничных условий на подветренной стороне обтекаемого тела в рамках теории исчезающей вязкости показано, что давление вихревого потока на поверхность может быть определено путем замены вихревого потока потенциальным, если на этой границе составляющую скорости, ориентированную по нормали к направлению движения тела, положить равной нулю.

Куликовский А. Г., Шикина И. С. (Москва). *Линейная стадия развития локализованных возмущений в неустойчивых течениях.*

Методом перевала исследована асимптотика решения задачи Коши для возмущений поверхности тангенциального разрыва в течениях с неустойчивостью Кельвина — Гельмгольца с учетом поверхностного натяжения. При больших временах волн разной длины, первоначально сосредоточенные в области локализации возмущений, расплываются в волновой пакет с растущей амплитудой, который расширяется линейно со временем. Найдены форма границы области роста возмущений, скорость роста локальной амплитуды волнового пакета, скорость движения его центра и картина гребней волн. Получены критерии абсолютной и конвективной неустойчивости. Аналогичное рассмотрение проведено для течений со слоем сдвига конечной толщины.

Гольдштик М. А. (Новосибирск), Степанов Г. Ю. (Москва). *Об основах теории центробежной форсулки.*

Схема и элементарная теория: использование принципа максимума расхода или интегральной теоремы импульсов. Гидравлическая теория водослива с широким порогом. Плоское течение в круговом канале. Приближенные аналитические решения задачи о водосливе в точной постановке. Об использовании для турбулентного течения принципов минимума скорости диссипации и минимума кинетической энергии. Ценность принципа максимума расхода для практических расчетов.

Атанов Г. А. (Донецк). *Вариационные задачи гидродинамики открытых русел.*

Дан обзор работ по указанной теме проводимых в Донецком государственном университете и в основном докладывавшихся на IV Школе (см. Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 4).

Глазков В. М., Гонор А. Л., Дуганов В. В., Зубин М. А., Остапенко Н. А. (Москва). *Гиперзвуковое обтекание тел звездообразной формы.*

Проведено экспериментальное исследование аэродинамического сопротивления серии звездообразных тел и эквивалентных им конусов в гелиевой импульсной трубе при $M=17,5$. Установлено, что сопротивление оптимальных звездообразных тел для удлиненной эквивалентного конуса $\lambda \leq 2$ в 1,4 раза меньше сопротивления конуса, что качественно совпадает с результатами, полученными ранее для сверхзвуковых скоростей. Сравнение результатов расчетов с экспериментом показали, что в гиперзвуковых течениях невозможно использовать традиционные модели типа толщины вытеснения пограничного слоя на пластине для получения оценок сопротивления звездообразных тел.

Кулешов В. И. (Харьков). *Аэродинамика несущих форм с треугольными корпусами.*

Экспериментально установлено, что в до- и сверхзвуковом потоках в отличие от осесимметричных круговых форм корпуса с треугольным поперечным сечением

обладают более высокими несущими свойствами, повышенным качеством и смещением центра давления к середине длины корпуса. Несущие свойства корпусов существенно зависят от ориентации относительно набегающего потока. При скольжении движению на корпусе образуется продольный крутящий момент, стабилизирующий корпус плоской гранью к набегающему потоку.

Еремеев И. Д., Усик Ю. Ф., Холявко В. И. (Харьков). *Аэродинамика профиля крыла с уступом.*

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости аэродинамических характеристик крыла при малых скоростях от положения уступа по длине хорды и от его высоты по толщине профиля. Установлены оптимальные геометрические параметры уступа при фиксированной форме носовой части, обеспечивающие безотрывное обтекание профиля на больших углах атаки и увеличение несущих свойств крыла малого удлинения, а также получение линейной зависимости коэффициентов подъемной силы и момента тангажа по углам атаки. Это объясняется образованием жидкого контура на верхней поверхности крыла и устойчивого вихревого течения.

Семенчин В. А. (Харьков). *Аэродинамика профиля с гибкой, растяжимой пленкой.*

Предлагается способ улучшения аэродинамических характеристик профиля за счет использования гибкой растяжимой пленки, герметично закрепленной на верхней поверхности исходного жесткого контура. При обтекании такого профиля появляющаяся разность давления под и над пленкой деформирует ее, улучшая несущие свойства и аэродинамическое качество профиля. Это подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями. Полученные результаты позволяют сформулировать идею создания самоадаптивного крыла, технологического в изготовлении и с высокими аэродинамическими характеристиками.

Ганган И. А., Журавлев В. Н., Коваль М. А., Сычев В. Б. (Харьков). *Экспериментальные исследования течений Коанда на круглом крыле вблизи экрана.*

Экспериментально решается задача о совместном действии отрывных течений и течений Коанда в окрестностях осесимметричного крыла, расположенного вблизи поверхности (экрана). При относительно малых расстояниях крыла от экрана в области между опорной поверхностью и крылом образуется воздушная подушка, обеспечивающая дополнительную подъемную силу. Величина суммарной подъемной силы может в 1,5–2,5 раза превысить исходный импульс струи. На величину коэффициента использования импульса существенно влияют форма верхней поверхности крыла и способ выдува струи на его поверхность.

Виноградов Ю. А., Зубков А. И., Лягушин Б. Е., Панов Ю. А. (Москва). *Обтекание сверхзвуковым потоком трехмерного препятствия, соизмеримого с толщиной пограничного слоя.*

Экспериментально исследована зависимость размеров области пространственного незамкнутого отрывного течения, возникающего в сверхзвуковом потоке перед трехмерным препятствием. Получены зависимости размеров отрывной зоны от числа Маха ($M=1,75-3,0$), формы и размеров препятствия, установленного на плоской поверхности, толщины пограничного слоя и отсоса газа через отверстие в препятствии.

Лоханский Я. К., Ульянов Г. С., Фалунин М. П. (Москва). *Сверхзвуковое обтекание пары тел. О перестройке течения.*

Рассматривается перестройка течения при сверхзвуковом обтекании пары тел, когда одно тело расположено в следе другого. Особое внимание уделено влиянию степени проницаемости поверхности второго тела на характер и закономерности указанной перестройки течения. Полученные новые результаты позволили уточнить существующие эмпирические зависимости для определения критического расстояния перестройки при сверхзвуковом обтекании пары тел.

Коваль М. А., Куролес В. К., Савчук В. Д., Руденко В. В. (Харьков). *Экспериментальное исследование пульсаций давления в прямоугольных выемках.*

При сверх- и дозвуковых скоростях течения экспериментально исследуется структура обтекания и пульсации давления в выемках. С помощью масляной визуализации установлено три основных типа течений: закрытые, открытые и смешанные с депланирующим слоем смещения потоков. Максимальные уровни пульсаций давления реализуются при определенных отношениях глубины к длине выемки. Имеется несколько частот с амплитудой на 5–15 дБ выше основного фона зашумленности выемки и на 30–50 дБ выше шума в пограничном слое перед выемкой. Дискретные составляющие в спектре пульсаций давления на некоторое расстояние передаются вперед по пограничному слою.

Боровой В. Я., Струминская И. В. (Москва). *Теплообмен в гиперзвуковом потоке в зоне падения на цилиндр плоского скачка уплотнения.*

В ударной трубе проведено систематическое экспериментальное исследование лиминарного теплообмена на скользящем цилиндре в зоне падения скачка уплотнения при числе Маха $M=15,5$ и числе Рейнольдса $Re=0,14 \cdot 10^5$ и углах скольжения

от -75 до $+37^\circ$. Были реализованы различные типы взаимодействия падающего скачка с головной ударной волной цилиндра. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами приближенных расчетов.

Г о л у б к и н В. Н. (Москва). *Новый асимптотический режим пространственного гиперзвукового обтекания крыла малого удлинения.*

В приближении тонкого ударного слоя обнаружен и исследован новый асимптотический режим обтекания наветренной поверхности тонкого крыла малого удлинения под углом атаки, близким к прямому. Он занимает промежуточное положение между обтеканием при конечных и очень близких к прямому углах атаки и сочетает присущие им особенности. В предельных по параметру подобия случаях данный режим переходит в них. Сформулировано основное уравнение, связывающее форму пространственного скачка уплотнения и поверхности крыла, даны его решения. Приведены характерные картины линий тока и распределение давления по крылу.

Р ы л о в А. И. (Новосибирск). *О возможных режимах обтекания заостренных тел конечной толщины при произвольных сверхзвуковых скоростях набегающего потока.*

Рассмотрено сверхзвуковое плоское обтекание симметричного заостренного тела, в каждой точке которого угол наклона стенки меньше предельного угла для ударной волны, отвечающей набегающему потоку. При любых скоростях потока невозможны течения с образованием как присоединенной ударной волны сильного семейства, так и с отошедшей ударной волной, с последующим дозвуковым течением между ударной волной, телом и звуковой линией. По существу результаты А. А. Никольского перенесены на случай произвольного числа Маха набегающего потока.

Чернов И. А., Брежнев А. Л. (Саратов). *Гипотеза о немонотонности расхода газа при запуске сопла Лаваля.*

В рамках квазистационарного подхода на основе трансзвуковых уравнений построены стационарные течения газа через одно и то же сопло с конечной кривизной стенки в критическом сечении, реализующие различные значения расхода. Показано, что расход, соответствующий моменту смыкания сверхзвуковых зон, имеет большее значение, чем в конце запуска.

Гувернюк С. В., Савинов К. Г. (Москва). *К обоснованию метода аналогового моделирования в задачах о сверхзвуковых течениях газа с сильными скачками уплотнения.*

Сопоставляются две краевые задачи: первая описывает двумерное течение с отошедшим скачком уплотнения около затупленного тела в сверхзвуковом потоке газа, вторая — течение с отошедшим гидравлическим прыжком около аналогичного тела в бурном потоке мелкой воды. Качественные различия этих задач определяются неполным совпадением соотношений на скачке уплотнения и гидравлическом прыжке. Сопоставление дает объяснение известных случаев совпадения экспериментальных данных аналогового моделирования и результатов расчета газодинамических течений для показателя адиабаты, отличного от двух.

Пейгин С. В. (Томск). *Гиперзвуковое обтекание затупленных тел неравномерным потоком газа под углами атаки и скольжения.*

В рамках модели трехмерного тонкого вязкого ударного слоя рассмотрено обтекание под углами атаки и скольжения трехосных эллипсоидов различной формы неравномерным потоком газа типа дальнего следа. Используется численный метод повышенного порядка аппроксимации, не требующий при своей реализации наличия в течении плоскостей симметрии. Показано, что влияние параметров неравномерности набегающего потока на структуру течения в ударном слое, коэффициенты трения и теплообмена на поверхности существенным образом зависит от числа Рейнольдса, формы тела, углов атаки и скольжения.

Демьянов Ю. А., Демьянова Н. А., Покровский А. Н. (Москва). *Формирование следа при разгоне и торможении пластины.*

Дано решение задачи о формировании следа за пластиной, начинающей при $t=0$ движение в своей плоскости в покоящейся среде со скоростью $v_\infty \sim t^n$, для интервала времени, когда влияние передней кромки на пограничный слой около задней кромки не проявляется. Течение в следе оказывается автомодельным, зависящим от переменных $z=y/\sqrt{v_\infty t}$ (Рэлея) и $\xi=x/S(t)$ (x отсчитывается от задней кромки $S(t)$ — пройденный путь).

Решение в окрестности задней кромки строится методом сращиваемых асимптотических разложений; начиная с некоторого $\xi=\xi_0$, оно используется для дальнейшего численного расчета всей области следа $0 \leq \xi \leq 1$. Отдельно рассмотрен случай $n=-0,5$, соответствующий «отрывному» профилю на пластине.

Окунев Ю. М., Раковский О. Ю., Черкасов М. Б. (Москва). *Исследование особенностей пространственного движения летящего тела.*

Рассмотрено нестационарное движение относительно центра масс тела пространственной аэродинамической формы в свободном полете, когда путевая скорость изменяется в соответствии с квадратичным законом сопротивления среды. Исследу-

ется точное аналитическое решение для упрощенной модели, качественно отражающей свойства движения. При положительном вращении тела вокруг продольной оси со скоростью, меньшей некоторой критической, характер двухчастотных колебаний продольной оси тела изменяется в процессе движения: одна из частот со временем возрастает, а вторая сначала убывает по модулю, а затем, изменив знак, начинает возрастать. Найден момент времени, отвечающий смене знака скорости прецессии, как функция определяющих аэродинамических параметров, начального значения путевой скорости и скорости собственного вращения тела. Установлена аналогия движения около центра масс тела пространственной аэродинамической формы и возмущенного движения гироскопа Фуко. Получена полная классификация траекторий на изображающей плоскости. Построено аналитическое решение, описывающее пространственное движение тела с учетом малого параметра, характеризующего отношение продольного и поперечного моментов инерции тела.

Пекуровский Л. Е., Поручиков В. Б. (Москва). *Дифракция акустической волны на упругой сферической оболочке, покрытой тонким сжимаемым слоем.*

Изучается линейное взаимодействие плоской акустической волны с упругой сферической оболочкой, на внешнюю поверхность которой нанесен тонкий слой амортизирующего покрытия. Этот слой моделируется специальным граничным условием на поверхности тела. Численно найдена сила, действующая на оболочку. Выведена приближенная формула для нестационарного распределения давления по поверхности оболочки, пригодная в случаях, когда сжимаемый слой достаточно мягок.

Сухоруков А. Н. (Москва). *О возникновении турбулентности в градиентных течениях.*

Рассматриваются различные механизмы перехода от ламинарного течения к турбулентному в плоских слоях смещения, затопленных струях, следах и их комбинациях. Задачи решаются в рамках трехмерных уравнений Эйлера при помощи метода Фурье и модифицированного метода Рэлея. Имеет место преимущественное развитие поперечной стоячей трехмерной волны. В струйных течениях обнаружено жесткое возбуждение при наличии коротковолновых трехмерных возмущений, соответствующих разностному резонансу. Кроме этого, в рамках уравнений Навье — Стокса исследована неустойчивость трехмерных (прямоугольных) затопленных струй. Получен трехмерный аналог дорожки Кармана.

Прудников А. Г., Тулупов Ю. И. (Москва). *Определение закона роста толщины турбулентного безградиентного пристеночного пограничного слоя.*

На основе структурных представлений о пограничном слое при больших числах Рейнольдса ($Re_x > 10^5$) как случайной последовательности вихревых клубков, растущих по времени подобно снежному кому, и следов распада крупных вихрей предыдущего каскада, тормозящих нестационарным ламинарным пограничным слоем (между вихревыми клубками), дается вывод соотношений для ряда параметров слоя, в том числе $\delta \sim x^{0.8}$. Для несжимаемого слоя имеет место удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Козлов В. В. (Новосибирск). *Исследование структуры и ламинарно-турбулентного перехода в отрывных течениях (успехи и проблемы).*

Приведен обзор результатов исследования ламинарно-турбулентного перехода в область отрыва потока. В основном уделено внимание возникновению и развитию возмущений в области трехмерных отрывных течений. Приводятся первые результаты по преобразованию внешних возмущений в собственные колебания сдвигового течения, возникающего в вихревой пелене при обтекании тел под большим углом атаки. Обсуждаются проблемы построения рациональных моделей ламинарного отрыва и предлагаются наиболее простые случаи, когда возникающие естественные возмущения не приводят к турбулентности в области отрыва. Приведены данные по восприимчивости и устойчивости данных течений.

Желтоводов А. А. (Новосибирск). *Закономерности развития турбулентного отрыва в сверхзвуковых потоках.*

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований широкого класса двумерных и пространственных отрывных течений в сверхзвуковых потоках. На основе новых данных о полях средних параметров и характеристик турбулентности выделены определяющие физические процессы, учет которых необходим при построении расчетных моделей. Анализируются возможности различных современных методов расчета, основанных на моделях идеального и вязкого газа. На основе полученных результатов и систематического обзора известных работ обсуждаются перспективные направления и методы исследований турбулентного отрыва.

Зубков А. И., Лягушин Б. Е., Панов Ю. А. (Москва). *Взаимодействие падающего трехмерного скачка уплотнения с турбулентным пограничным слоем.*

Экспериментально исследовано взаимодействие конического скачка уплотнения с пограничным слоем большой толщины ($\delta = 13,5$ мм, $M = 3$). В зависимости от угла раскрытия конуса, образующего скачок, и высоты его расположения над плоской поверхностью возникают четыре различные пространственные системы скачков

уплотнения: простое без отрыва пограничного слоя отражение скачка; система скачков с одной четверной областью пересечения; с двумя тройными областями пересечения и скачком между ними; с одной тройной областью и искривленным основным скачком. Найдены зависимости размеров зоны незамкнутого пространственного отрывного течения и характерных давлений в ней от интенсивности падающего скачка и высоты его над поверхностью.

Максимов А. И., Харитонов А. М. (Новосибирск). *Отрывные течения при обтекании комбинации внешнего и внутреннего прямых углов.*

Представлены результаты экспериментальных исследований сложных турбулентных отрывных течений, реализующихся при сверхзвуковом обтекании плоской поверхности с продольным уступом, образующим внешний и внутренний прямые углы. Анализируются картины предельных линий тока, вихревых образований и поля статических давлений для наиболее характерных режимов течений, определяемых различными сочетаниями углов атаки и скользяния модели. Выявлены газодинамические структуры, характерные для существования трехмерных смешанных интерференционно-дифракционных течений, которые реализуются при обтекании призматических надстроек на несущих поверхностях.

Желтоводов А. А., Яковлев В. Н. (Новосибирск). *Развитие методов управления режимами отрывных течений в кавернах.*

Рассматриваются результаты исследований особенностей сверхзвукового ($M = 2-4$) обтекания прямоугольных каверн конечной ширины. При фиксированных параметрах потока и длине каверны уменьшение отношения ее ширины к глубине приводит к смене открытого режима обтекания закрытым. Для узких каверн при монотонном росте числа Маха возможен переход от открытого режима к закрытому и обратно. Устранение перетекания газа через боковые стенки посредством установки вертикальных пластин заметно уменьшает область существования закрытых режимов. Предложен эффективный метод стабилизации открытого режима с помощью пассивного перепуска газа через перфорированную поверхность из области высокого давления в зону пониженного.

Глотов Г. Ф. (Москва). *Управление турбулентными отрывными зонами в сверхзвуковых потоках.*

Экспериментально исследуются задачи повышения углов расширения турбулентных отрывных зон в пристенных течениях перед препятствием.

Муштаков Д. А., Лапотко В. М. (Харьков). *Модель турбулентного течения среды.*

Предложена модель развитых турбулентных течений, пульсационные члены в которой связаны с характеристиками движения на основе законов сохранения и идей А. Н. Колмогорова.

Бормусов А. А., Глебов Г. А., Козлов А. П. (Казань). *Диагностическая система для исследования отрыва и присоединения потока на обтекаемых поверхностях.*

Основу системы составляют пленочные термоанемометрические датчики, чувствительные к направлению потока, а также специальная аналоговая и цифровая электронная аппаратура. Проведено исследование некоторых типов дозвуковых отрывных течений. Обнаружено, что течение в окрестности точек отрыва и присоединения потока существенно нестационарно, а плотность распределения вероятности мгновенной величины напряжения трения описывается сложной зависимостью с двумя максимумами.

Гольдштик М. А., Ханин В. М. (Новосибирск). *Проблемы гидродинамики пузырьковых течений.*

Предложены уравнения движения жидкости с дисперсными включениями, пригодные при больших концентрациях и позволяющие описать инерционные эффекты, связанные с относительным движением фаз. Рассмотрена задача о пузырьковых течениях в вертикальной трубе. Качественно описаны наблюдаемые профили скорости и газосодержания. Для течения вниз получено количественное соответствие экспериментальным данным по эффекту аномально высокого трения.

Кравец В. Н. (Харьков). *Исследование характеристики струйного течения с частицами.*

Разработана экспериментальная установка по созданию струйных течений газа, содержащего сухие и влажные абразивные частицы. Получены характеристики для распределения концентрации частиц, их скорости в зависимости от удаления от среза сопла и способа ввода частиц в газовый поток. Предложена модель по расчету параметров двухфазного течения на основном участке струи, разработана методика определения характеристик потока. Результаты могут быть использованы в исследованиях аэроабразивного износа материалов обтекаемых поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов.

Безкровный С. В., Блинков В. Н., Иваненко Н. И. (Харьков). *Моделирование динамических процессов в двухфазном теплоносителе замкнутых циркуляционных систем, включающих струйные преобразователи энергии.*

Представлена численная модель для анализа нестационарных процессов в двухфазном теплоносителе многоэлементного циркуляционного контура, работающего с использованием струйного сепарационного насоса либо инжектора-конденсатора. Дан анализ развития переходного процесса при изменении тепловой нагрузки, возникновения колебательной неустойчивости и т. д. Показаны особенности карты режимов течения кипящего теплоносителя в условиях нулевой гравитации. Сформулирована программа реализации идеи безмашинной прокачки двухфазного теплоносителя.

Соловьев А. А., Севастьянов А. П., Шпильрайн Э. Э. (Москва). *Модель течения двухфазного потока при смешении сверхзвуковой струи пара с недогретой жидкостью в суживающемся канале.*

На основе односкоростной и двухтемпературной модели проведен непрерывный расчет двухфазного течения в камере смешения струйного насоса-конденсатора с кольцевым периферийным подводом воды до конца проточной части аппарата. Из сопоставления результатов расчетов с опытами следует, что известный в литературе «горб» давления в конце камеры смешения вызван влиянием пристенного слоя жидкости. Качественное сопоставление расчетных данных достижимого противодавления за аппаратом с характеристиками из опытов хорошее.

Вайнштейн С. И., Севастьянов А. П., Шпильрайн Э. Э. (Москва). *Экспериментальное определение скорости истечения двухфазного потока из инжектора.*

Исследовано влияние размера минимальной площади камеры смешения конденсационного инжектора на характеристику аппарата. Методом активного измерения импульса струи, истекающей из камеры, определено влияние трения и неизобаричности на коэффициент скорости камеры смешения струйного насоса. Представлены формулы, позволяющие определить коэффициент скорости и среднюю плотность двухфазного потока на выходе из камеры смешения по известным геометрическим и начальным режимным параметрам.

Петухов И. И., Фролов С. Д., Турнов М. А., Ястремский И. П. (Харьков). *Исследование рабочего процесса струйных охладителей криогенных жидкостей и контуров с их использованием.*

Определена достижимая эффективность струйного охладителя, выявлены его преимущества и недостатки. Теоретически и экспериментально исследованы характеристики охладителя и его элементов. Показана необходимость детального исследования процесса формирования отсепарированного слоя, целесообразность совмещения процессов расширения и сепарации фаз вскипающего потока при глубоком охлаждении криожидкостей. Разработан упрощенный метод расчета статических характеристик струйного охладителя, выполнена проверка его адекватности экспериментальным данным.

Блинков В. Н., Иваненко Н. И. (Харьков). *Моделирование динамических процессов в двухфазном теплоносителе замкнутых циркуляционных систем, включающих струйные преобразователи энергии.*

Представлены математическая модель и реализующая ее ЭВМ-программа для анализа нестационарных процессов в двухфазном теплоносителе многоэлементного циркуляционного контура, работающего с использованием струйного сепарационного насоса либо инжектора-конденсатора.

Блинков В. Н., Горбенко С. А., Никонов А. А., Фролов С. Д. (Харьков). *Исследование и разработка системы терморегулирования на базе струйного сепарационного насоса.*

Анализируются проблемы, возникающие при реализации идеи безмашинной прокачки теплоносителя в замкнутом термоциркуляционном контуре за счет утилизации в термодинамическом цикле части отводимой от объекта теплоты. Рассмотрены математические модели для выполнения проекторочных расчетов, прогнозирования статических характеристик, анализа переходных режимов и устойчивости контуров.

Эксперименты на фреонах 113, 114 показали, что при нормальном уровне температур, перепаде $15-60^\circ$ и мощности теплоисточника $5,5 \pm 1,65$ кВт «самоциркуляция» теплоносителя осуществлялась устойчиво. Допустимое гидросопротивление контура при использовании инжектора-конденсатора составляло 0,06 МПа и сепарационного насоса — 1,5 МПа. Термоциркуляционные контуры рекомендуется применять для переноса теплоты в системах с длительной автономной эксплуатацией, к которым предъявляется требование высокой надежности.

Бортников Л. Н., Сетин В. И. (Москва). *Экспериментальное исследование диффузионных пламен при сверхзвуковом истечении газообразного топлива в спутный поток воздуха.*

Представлены результаты экспериментального исследования размеров области диффузионного горения горючих компонентов в газовой струе, истекающей в спутный поток воздуха. Получены зависимости изменения геометрических размеров факела горения от числа Рейнольдса и спутности потока. С увеличением числа Рей-

нольдса длина факела линейно увеличивается, а с увеличением спутности — линейно уменьшается. При определенных условиях горение происходит не только в наружном слое факела, но и в ряде его поперечных сечений. Это позволяет предположить, что горение может происходить на границах областей, имеющих регулярную бочкообразную структуру.

Гришин А. М. (Томск). Структура течения в зоне действия крупного лесного пожара и использование летательных аппаратов для борьбы с ним.

Решена задача о структуре течения в приземном слое атмосферы в зоне действия крупного лесного пожара с учетом ветра, при безветрии, с учетом стратификации атмосферы и турбулентности течения. В окрестности фронта пожара имеет место крупный торoidalный вихрь. Представлены результаты полунатурных экспериментальных исследований характеристик течения над зоной пожара в атмосфере и динамики полета летательных аппаратов. Даны оценки допустимых высот полета для летательных аппаратов над низовыми и верховыми лесными пожарами.

Вайнштейн П. Б., Моргунов Ю. А. (Москва). Влияние акустических колебаний на распространение горения аэровзвесей в ограниченном канале.

Рассматривается двумерная нестационарная задача горения аэровзвесей в плоском полуограниченном канале. Представлены результаты численного решения системы уравнений механики многофазных сред, описывающей горение монотоплива. Если характерное время распространения горения меньше полупериода продольных акустических колебаний, то скорость конвективного горения увеличивается вплоть до достижения фронтом открытого конца. В противном случае после ускоренного распространения горения происходит его замедление. Указанные режимы горения согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Бармин А. А., Пушкарёв Е. А. (Москва). Наклонное столкновение ударных волн в магнитной гидродинамике.

В рамках идеальной магнитной гидродинамики исследуется наклонное встречное столкновение двух быстрых ударных волн. Регулярное автомодельное решение строится численно во всей области определяющих параметров. Возникающее течение содержит по крайней мере одну ударную волну (быструю или медленную) с каждой стороны от контактного разрыва. В квазипараллельном случае (по векторам скорости и напряженности магнитного поля) интенсивность «преломленных» быстрых ударных волн увеличивается незначительно, а медленных — мала. В квазиперпендикулярном случае имеют место резкие нелинейные перестройки решения, интенсивности всех типов волн одного порядка. Характерно сильное сжатие среды магнитным полем и увлечение им газа.

Баулин Н. Н., Тихомиров С. Г. (Москва). Измерение электрофизических параметров плазменных образований около моделей в аэробаллистическом эксперименте.

Выполнены измерения электрических зарядов на моделях и в следах за ними при числах Маха $M_\infty \approx 10$, когда образующийся на теле заряд благодаря проводимости окружающей его плазмы стекает в след. Электронная концентрация в следе измерялась СВЧ-резонаторами открытого и закрытого типов. Исследовано влияние давления и состава газа в баротрассе (смесь воздуха с ксеноном), материала поверхности модели (медь, сталь, стеклотекстолит, сплавы Вуда, Розе, АМГ-6) и механизма его разрушения на распределение электрического заряда.

Голубятников А. Н. (Москва). Асимптотические условия отделения энергии-импульса от массы в релятивистской газовой динамике.

Развивается асимптотическая теория относительно тонкого релятивистского ударного энергетического слоя, возникающего при разгоне сильной ударной волны до скорости света. Получены необходимые условия, определяющие начальное распределение плотности, для асимптотического отделения в виде излучения конечной энергии-импульса от массы в окрестности фронта ударной волны. Построенное ранее точное решение полной задачи о поршне приводит к наилучшему отделению энергии-импульса. В связи с астрофизическими приложениями дано вычисление асимптотик спектров космических лучей при больших энергиях.

Гилинский М. М., Малюнтов Г. Я., Толстов В. Н. (Москва). Комплекс программ для расчета многофазных газодисперсных и парокапельных струйных течений.

Создан комплекс программ для ЭВМ БЭСМ-6, ЕС-1045 и ПК IBM-PC/AT (386), с помощью которых можно проводить исследования широкого круга задач многофазной газодинамики и в первую очередь для струйных вязких и невязких стационарных двумерных и трехмерных, а также нестационарных двумерных потоков, истекающих в затопленное пространство, спутный поток или вакуум. Используются различные упрощающие допущения при описании течения в отдельных подобластях течения. Учитываются процессы испарения, гомогенной и гетерогенной конденсации, горения частиц, дробления и коагуляции капель, радиационный теплообмен, турбулентное смешение потоков.

Лифшиц Ю. Б., Сакович В. С. (Москва). *Метод расчета обтекания заостренных тел при небольших сверхзвуковых скоростях.*

Небольшая интенсивность возникающих скачков уплотнения позволяет ограничиться потенциальным приближением, однако из-за возможности появления областей с дозвуковыми скоростями численный метод должен допускать возможность решения смешанных эллипτικο-гиперболических задач. Предлагаемая процедура интегрирования уравнения для потенциала представляет собой глобальные итерации, каждая из которых состоит из маршевого прохода в направлении потока. В случае полностью сверхзвукового течения выполняется только одна итерация. Приводятся особенности реализации метода и результаты расчетов обтекания ряда трехмерных конфигураций.

Амброжевич А. В., Мунштуков Д. А. (Харьков). *Метод численного моделирования нестационарных газодинамических процессов в решетках профилей.*

Модель течения построена на основе приближения несущего диска конечной толщины и может быть двух- или трехмерной. Механизм взаимодействия потока среды с решеткой профилей имитируется системой источников-стоков импульса, с которыми связаны действующие в системах с подвижными решетками источников-стоков энергии. Для реализации модели применен трехшаговый конечно-разностный метод, использующий принцип расщепления по физическим процессам на каждом временном слое. Работоспособность модели подтверждена результатами решения ряда модельных и практических задач.

Забродин А. В., Куценко Е. М., Черкашин В. А., Якушев С. А. (Москва). *Численное моделирование сверхзвукового обтекания тел сложной формы и расчет аэродинамических характеристик летательных аппаратов.*

Работа посвящена проблеме расчета сверхзвукового обтекания тел сложной формы. Используются методы расчета, основанные на зональном подходе, сочетающем метод установления в зонах трансзвукового течения с маршевым методом в зонах стационарного сверхзвукового течения. Турбулентный пограничный слой учитывается заданием неравномерности потока вблизи поверхности тела, т. е. рассматривается как источник завихренности. Подобный подход позволяет численно моделировать отрывные течения в рамках уравнений Эйлера в частности получать поля давления, включая донную область.

Белик В. В., Меньшиков В. А., Скоб Ю. А., Угрюмов М. Л. (Харьков). *Численное моделирование пространственного отрывного течения в каналах турбомашин с учетом вязкости.*

Разработан и реализован в виде программного комплекса метод расчета адиабатического трехмерного потока в межлопаточном канале венца турбомашин на основе схемы вязко-невязкого взаимодействия пространственного пограничного слоя и невязкого ядра потока. Метод апробировался на расчете течения газа в прямой диффузорной решетке, а также в рабочем колесе одноступенчатого компрессора. Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ермаков В. В., Большун В. Г., Чермянин В. Н., Халимов В. Б. (Москва). *Сеточный метод исследования аэродинамических характеристик тел вращения с отрывными зонами.*

Представлен инженерный метод исследования аэродинамических характеристик тел вращения конически-цилиндрической формы при наличии на их поверхности отрывных зон турбулентного пограничного слоя, индуцированных твердыми или струйными препятствиями. Метод основан на использовании «сеточных» зависимостей аэродинамических коэффициентов, обобщающих большой цикл параметрических расчетов и позволяющих оперативно и с достаточной для практики точностью определять их уровень для любого произвольного положения отрывной зоны на теле. Представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных материалов.

Гувернюк С. В., Савинов К. Г. (Москва). *Численное моделирование течений около затупленных проницаемых экранов в неравномерном сверхзвуковом потоке.*

Рассматривается осесимметричное обтекание затупленных выпуклых и вогнутых проницаемых экранов неравномерным сдвиговым сверхзвуковым потоком типа следа. Проницаемый экран моделируется поверхностью гидродинамического разрыва. Течение описывается в рамках уравнений Эйлера. Используется численный метод установления с применением схемы второго порядка. Проведенные расчеты показали, что наличие проницаемости может существенным образом изменить характер обтекания экрана, приводя к ликвидации возвратно-циркуляционных зон. Исследована зависимость коэффициента сопротивления экранов от характера неравномерности набегающего потока и от величины и распределения проницаемости.

Куценко Е. М., Черкашин В. А., Якушев С. А. (Москва). *Расчет сверхзвукового обтекания тела с учетом вдува газа в донную область.*

Представлены результаты расчета сверхзвукового осесимметричного обтекания тела с учетом вдува газа в донную область. Особенностью расчета является выде-

ление границы, отделяющей вдуваемый газ от газа, обтекающего тело, что позволяет использовать различные уравнения состояния. Рассмотрена зависимость донного давления от интенсивности вдува.

Величко С. А. (Москва). *Решение задачи обтекания профиля при больших числах Рейнольдса.*

В рамках концепции взаимодействующего пограничного слоя сформулирован итерационный двухшаговый метод решения задачи, который обеспечивает устойчивость и быструю сходимость итерационной процедуры при расчетах безотрывного и отрывного обтекания в диапазоне чисел Рейнольдса 10^6 – 10^8 . Положение точки перехода может быть фиксировано или определено в процессе решения по эмпирическому критерию свободного перехода от ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Результаты численного решения задачи хорошо согласуются с данными опытов в аэродинамических трубах.

Ильинский Н. Б., Елизаров А. М., Поташев А. В. (Казань). *Краевые задачи проектировочного характера в дозвуковой аэродинамике.*

Описаны решения задач построения крыловых профилей в потоках идеальной и вязкой жидкостей и в дозвуковом потоке газа при различных способах задания исходного распределения скорости. Рассмотрены также обратные краевые задачи для решеток профилей, для профилей с отсосом, с закрылками, для диапазона углов атаки, вариационные задачи. Описаны математические аспекты теории и результаты числовых расчетов. Уделено внимание перспективам развития этого направления.

Тимошенко В. И. (Днепропетровск). *Численное моделирование турбулентных струйных и отрывных течений.*

В приближении вязкого взаимодействия и полного вязкого ударного слоя рассматривается ряд задач о струйных и отрывных течениях вязкого газа: распространение дозвуковых струй в спутном сверхзвуковом безграничном потоке, в трубе или канале; маховское взаимодействие ударных волн; диффузионное горение дозвуковых струй в спутном сверхзвуковом потоке; течение вязкого газа в сопле Лаваля; течение в несимметричных отрывных зонах за клином под углом атаки и за осесимметричным телом в сверхзвуковом потоке при наличии кормовой сверхзвуковой струи.

Корнеев А. И., Шуталев В. Б. (Калинин). *Математическое моделирование поведения стержней при ударе.*

В рамках модели сжимаемого упругопластического тела на основе численного решения трехмерных задач анализируется поведение длинных стержней при приложении динамических нагрузок ударного типа.

Васенин В. А., Зенкин А. Н., Макаров А. А., Панюшкин Н. И., Стронгин М. М., Турков В. А. (Москва). *Аппаратно-программные средства систем автоматизации аэродинамического эксперимента.*

Опыт сопровождения и развития аппаратных средств систем автоматизации эксперимента показывает, что перспективными являются: иерархия в архитектуре комплекса технических средств; создание базовых структур, адаптируемых к условиям эксперимента и создание на нижнем уровне автономных терминальных станций. Высокая степень структурирования предметной области создает предпосылки для подготовки программного обеспечения в виде пакетов прикладных программ, рассчитанных на пользователя, хорошо знающего технологию эксперимента, но не обладающего навыками в программировании.

Африканова М. И., Быстров В. В., Красильщиков А. П., Наконечный О. В., Троицкий В. В., Шумейко В. В. (Москва). *Применение планерных летающих лабораторий для аэродинамических исследований.*

Летные исследования на планерных летающих лабораториях позволяют определять аэродинамические характеристики элементов летательных аппаратов в условиях натурального полета, что особенно важно для задач по определению характеристик пограничного слоя. Испытания при числах $Re = (2-5) \cdot 10^{-6}$ проведены на научно-исследовательской базе ЦАГИ (вблизи г. Феодосия).

А. А. Бармин