

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ АН СССР
СЕМИНАРЫ¹**

Общий семинар Института проблем механики АН СССР под руководством А. Ю. Ишлинского.

16 III 1972. В. М. Ентов (Москва) *Исследования фильтрации аномальных жидкостей.*

Рассматриваются задачи фильтрации, не следующей закону Дарси в диапазоне малых скоростей. Проанализирована общая система уравнений стационарного движения и эквивалентный ей вариационный принцип. На основе линеаризующего преобразования годографа, аналогичного преобразованию С. А. Чаплыгина, в газовой динамике разработана техника решения плоской задачи фильтрации с предельным градиентом и получены решения для ряда основных систем расстановки скважин. Предложена система уравнений совместного движения несмешивающихся вязкопластических жидкостей; исследована устойчивость фронтального вытеснения и изучена зависимость показателей вытеснения от скорости. Рассмотрены движения в гетерогенных пластах и нестационарные движения; проанализированы возможности определения параметров пласта. На основе полученных решений сделаны выводы общего характера об особенностях разработки нефтяных месторождений при проявлении фильтрующимися жидкостями аномальных свойств.

Установлен диапазон значений предельного градиента давления, в котором нелинейные эффекты должны учитываться при анализе и проектировании разработки месторождений.

6 IV 1972. В. В. Струминский (Москва) *Динамическая теория турбулентных движений жидкости и газа.*

Рассматриваются возможности построения теории турбулентности на основе использования основных положений общей динамической теории газов и кинетической теории материи.

В фундаментальной работе Рейнольдса (1895 г.) было впервые указано на необходимость использования методов кинетической теории газов для разделения молярного движения на среднее и относительное молярное движение. Однако в должной мере это не было сделано Рейнольдсом, и поэтому его система уравнений оказалась не замкнутой. Современная кинетическая теория газов, основанная на уравнении Больцмана, описывает весьма широкий класс различных течений газа. Однако эта теория непосредственно не описывает развитые турбулентные течения газа.

В работах автора (1960—1965 гг.) было указано на возможность обобщений кинетической теории газов при использовании принципа асимметрии функции распределения и получена система кинетических уравнений, которая решается методом Энскогога.

В результате получена замкнутая система уравнений Рейнольдса. Решение этой системы даже для простейших турбулентных течений связано с определенными трудностями. Однако анализ уравнений показывает, что разрабатываемая теория турбулентности правильно объясняет ряд экспериментальных фактов, и в частности процесс турбулентного перемешивания.

13 IV 1972. В. А. Романов (Москва) *Устойчивость в нелинейной постановке плоскопараллельного течения Куэтта.*

Рассматривается уравнение Орра — Зоммерфельда для плоского течения Куэтта. Доказывается, что при любом числе Рейнольдса и любых значениях волновых чисел спектр задачи лежит в нижней полуплоскости.

Затем используется представление решения для конечных возмущений в виде решения нелинейного операторного уравнения, в котором основной оператор соответствует линеаризованной задаче и на основании этого доказывается асимптотическая устойчивость решений нелинейного уравнения Навье — Стокса, мало уклоняющихся в начальный момент от стационарного решения.

27 IV 1972. О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов (Москва) *Исследование сложных задач аэродинамики методом «крупных частиц».*

Рассматриваются численные методы решения сложных задач газовой динамики и развитие численных методов по мере усложнения задач и усовершенствования вы-

¹ Информацию о содержании семинаров ИПМ см. также в Изв. АН СССР, МТТ, 1973, № 2.

числительных машин. Особое внимание уделяется методу «крупных частиц», основанному на поэтапном учете локальных и конвективных составляющих процессов переноса, завершающей стадией которого является удовлетворение уравнений сохранения массы, энергии и импульса.

Метод предназначен для реализации на мощных ЭВМ и позволяет вести глобальный расчет обтекания аппаратов сложной формы в широком диапазоне чисел Маха. Приводятся многочисленные примеры расчета, демонстрирующие возможности метода и позволяющие установить качественные особенности изучаемых газодинамических течений.

11 V 1972. **А. Н. Крайко** (Москва) *Некоторые вариационные задачи газовой динамики.*

В приближенной и точной постановке рассматриваются различные вариационные задачи о построении оптимальных контуров тел, сопл и т. п. При этом используются законы сопротивления Ньютона и Буземана, одномерное (гидравлическое) приближение и уравнения линейной теории, учитывающие эффекты неравновесных физико-химических процессов и двухфазности.

В точной постановке решаются задачи о построении оптимальных плоских или осесимметричных контуров (тел или сопл), обтекаемых сверхзвуковым потоком. Указанные задачи разделяются на два класса. Задачи первого класса допускают переход к контрольному контуру, что позволяет понизить размерность задачи. Задачи второго класса не допускают такого перехода, и для их решения требуется применять общий метод множителей Лагранжа.

25 V 1972. **Ю. З. Митропольский** (Москва) *О внутренних гравитационных волнах в океане.*

Изложен подход к происхождению статистического ансамбля внутренних гравитационных волн в океане. Изучается распространение внутренних волн в океане со случайными неоднородностями поля плотности. Рассматриваются механизмы генерации внутренних волн и предлагается резонансная теория генерации волн пульсациями атмосферного давления. Предлагается методика наблюдения и интерпретация экспериментальных данных о внутренних волнах. Предлагаемая методика иллюстрируется наблюдениями в океане. Оценивается влияние нелинейных эффектов на статистические распределения ансамбля внутренних волн. Обсуждаются вопросы неустойчивости внутренних волн и возможность генерации ими турбулентности в океане.

8 VI 1972. **В. М. Волосов** (Москва) *Нелинейные волны в стратифицированной среде.*

Предлагаются методы исследования существенно нелинейных волн конечной амплитуды в стратифицированной среде, свойства которой плавно изменяются в некотором заданном направлении. Волны такого типа описываются сложными нелинейными уравнениями в частных производных, для решений которых разработана асимптотическая схема. Роль малого параметра в асимптотических разложениях играют величины, характеризующие плавность изменения свойств среды и малость возмущений. Приложения методов иллюстрируются некоторыми задачами теории нелинейных внутренних волн в океане.

5 X 1972 г. **В. И. Полежаев** (Москва) *Некоторые задачи конвективного теплообмена в условиях невесомости и слабых полей массовых сил.*

Рассматриваются возможные механизмы перемешивания жидкостей и газов в условиях невесомости и слабых полей массовых сил. Показывается, что в этих условиях на температурное поле при длительном прогреве жидкостей наиболее существенное влияние могут оказывать термокапиллярная и естественная конвекции. Для изучения этих эффектов выполнено численное решение нелинейных уравнений конвекции в приближении Буссинеска с учетом градиентов сил поверхности жидкости.

Исследуются возможные случаи возбуждения термокапиллярных движений в условиях невесомости: а) при подводе тела вдоль поверхности жидкости и б) по нормали к поверхности (неустойчивость Марангони).

Рассматриваются основные свойства естественной конвекции в ослабленном поле массовых сил и совместное действие естественной и термокапиллярной конвекций.

19 X 1972. А. М. Обухов (Москва) *Системы гидродинамического типа.*

Системы дифференциальных уравнений, возникающие при аппроксимации уравнений гидродинамики несжимаемой жидкости по методу Галеркина, являются квадратично нелинейными и допускающими квадратичный интеграл движения. Такие системы при условии сохранения фазового объема при движении, обеспечивающего применимость теоремы Лиувилля, названные автором системами гидродинамического типа (СГТ), удобно исследовать инвариантными тензорными методами.

Показано, что простейшей нетривиальной СГТ является триплет (три взаимодействующие моды), уравнения движения которого (в надлежаще выбранной системе координат) совпадают с классическим уравнением Эйлера в теории гироскопа. Конкретной реализацией триплета в гидродинамике является движение несжимаемой жидкости в эллипсоидальной полости с линейным распределением скоростей. Исследуется вынужденное движение триплета при наличии внешней «силы» и линейного трения (стационарные режимы и их устойчивость). Приводятся результаты лабораторного эксперимента с ртутью, заполняющей трехосный эллипсоид, движение которой возбуждается вращающимся магнитным полем. При этом подтверждается вывод о неустойчивости «жидкого вращения» вокруг средней оси и наблюдается эффект «опрокидывания».

Модель триплета используется для построения более сложных СГТ типа почки, с помощью которых можно математически моделировать процессы, характерные для развитого турбулентного потока (нелинейный перенос энергии в область диссипации).

16 XI 1972. Г. С. Глушко, В. А. Солопов (Москва) *Некоторые особенности процессов переноса в изотропной турбулентности.*

Для описания турбулентных течений типа пограничного слоя с теплообменом употребляется система, состоящая из уравнений Рейнольдса, уравнения неразрывности, уравнения переноса тепла, энергии и масштаба турбулентности. Получены формулы для турбулентных вязкости, теплопроводности и диссипации энергии турбулентности с учетом неизотропности турбулентности, появляющейся под влиянием сдвига, вязкого взаимодействия с твердой поверхностью и неравномерного распределения в пространстве энергии турбулентности. Проведено интегрирование системы уравнений для ряда течений. Результаты интегрирования сравниваются с экспериментальными данными.

14 XII 1972. В. Б. Либрович (Москва) *Периодические решения в теории горения.*

Рассматриваются некоторые из периодических решений в теории горения, возникающие вследствие взаимодействия кинетики экзотермических химических реакций с газодинамикой и процессами тепломассопередачи. Периодические решения могут быть различной природы: пространственные стоячие волны — ячеистые пламена, возникающие из-за неустойчивости плоского фронта пламени; бегущие волны, распространяющиеся вдоль поверхности пламени; периодическая структура поверхности твердого вещества, появляющаяся при горении пороха в потоке газа; пульсирующие скачкообразные режимы распространяющегося плоского фронта экзотермической реакции в конденсированном веществе.

Приведена общая постановка задачи о распространении периодических волн, движущихся с постоянной скоростью вдоль поверхности пламени. Получено решение этой задачи в первом приближении по амплитуде волны и установлены необходимые условия, обеспечивающие существование периодических волн. Проанализированы различные рекомологические модели искривленного пламени с точки зрения этого эффекта.

Семинар по механике сплошной среды под руководством Л. А. Галина

7 IV 1972. П. Н. Роу (Лондон) *Последние исследования в области механики взвешенного слоя, проведенные в Лондонском университете.*

Главное направление исследований, проводимых в Лондонском университетском колледже, — выяснение механизма работы химических реакторов с взвешенным слоем, детальное изучение соответствующих физических процессов. Один из важнейших этапов этой работы — проверка модели путем изучения химических реакций, осуществляемых в реакторе с взвешенным слоем.

На протяжении последних пяти лет группой сотрудников технического факультета Лондонского университета проводились исследования, направленные на получение информации о скорости массообмена между газом в облаке, окружающем пузырь, и газом в прилегающих участках взвешенного слоя, изучение изменения раз-

меров пузырей с высотой в зависимости от определяющих параметров, таких как скорость газа, размеры частиц, конструкция газораспределительного устройства. Проводились также испытания моделей и анализ процессов расслоения твердой фазы. В докладе дан обзор последних результатов в этой области.

29 V 1972. М. И. Хмельник (Москва) *О фундаментальных течениях на многосвязных криволинейных поверхностях и параметрических методах исследования краевых задач.*

Рассмотрены течения идеальной несжимаемой жидкости на многосвязных криволинейных поверхностях и связанные с ними течения на многолистных римановых поверхностях. Дан метод однозначного построения фундаментальных течений на указанных поверхностях и метод качественного изучения этих течений. Приведены приложения указанных теоретических исследований к практическим задачам фильтрации.

Сформулирован в общем виде метод решения краевых задач гидродинамики путем использования вспомогательных функций, дана их классификация, приведено решение ряда задач гидродинамики с помощью новых вспомогательных функций. Подобные методы распространены на исследования фильтрационных течений в кучечно-неоднородных областях.

29 IX 1972. Н. Г. Асрян (Ереван) *Некоторые задачи удара тела о поверхность жидкости.*

Рассматривался удар тонкой цилиндрической оболочки о поверхность сжимаемой жидкости. Предполагалось, что оболочка достаточно тонкая, давление, действующее на нее, велико и поэтому в ней происходят пластические деформации. При этих условиях можно пренебречь прочностными свойствами и принять во внимание только инерционные силы. Определены перемещения оболочки и изменения давления, действующего на оболочку.

Рассматривался удар твердой пластинки о поверхность несжимаемой жидкости при наличии между ними некоторого газа. В случае несжимаемого газа задача сводится к решению нелинейного интегрального уравнения относительно функции распределения давлений в газовом слое. При сжимаемом газе задача определения функции давления сводится к решению квазилинейного уравнения параболического типа. На конкретном примере для этих двух случаев определены моменты времени замыкания пластинки с жидкостью и распределения давлений в газовой подушке.

13 X 1972. В. И. Найденев (Москва) *Некоторые задачи о движении вязкой жидкости при наличии теплопередачи.*

Рассматривался ряд задач о стационарном движении вязкой несжимаемой жидкости при экспоненциальной зависимости динамического коэффициента вязкости от температуры. Исследовались плоские и осесимметричные течения, которые допускали существование функции тока. В системе уравнений пренебрегалось инерционными и диссипативными эффектами. Был предложен математический метод исследования такого рода задач, заключающийся в разложении функции тока и температуры в ряд по степеням некоторого параметра, выбор которого диктовался особенностями течения.

Рассматривались следующие задачи: плоскопараллельное течение вязкой жидкости; медленное движение вязкой жидкости в конусе и между соосными конусами; задачи Игла — Фергюсона о теплообмене в капельной жидкости при постоянном удельном тепловом потоке через стенки трубы; течение вязкой жидкости в плоском диффузоре. В этих задачах отмечалось сильное влияние знака градиента температур на динамические и тепловые характеристики течения.

Семинар по физико-химической аэромеханике и проблемам химической технологии под руководством В. В. Струминского.

7 II 1972. Ю. П. Гупало, Ю. С. Рязанцев (Москва) *О химических реакторах и некоторых задачах теплообмена частицы с ламинарным потоком.*

Приводится решение задач о существовании, единственности и устойчивости стационарных режимов работы химического реактора. Исследована модель реактора с интегральным учетом тепловыделения и зависимости вязкости от температуры. Методом сращиваемых асимптотических разложений получено решение ряда задач о тепло- и массообмене движущихся твердых частиц и капель, на поверхности которых протекает химическая реакция первого порядка. Получено выражение для числа Нуссельта при конечных числах Рейнольдса и Пекле. Решена задача о массообмене частицы в потоке со сдвигом.

20 III 1972. А. М. Головин (Москва) *Движение и испарение капель.*

Показано, что при интенсивном испарении капли скорость внутреннего движения заметно уменьшается по сравнению со случаем медленно испаряющейся капли. Вычислена сила сопротивления и скорость квазистационарного испарения капли при числах Рейнольдса и Пекле в паро-газовой среде $R_\infty < 1$, $P_\infty < 1$, $RR_\infty < 1$; $PP_\infty < 1$, рассчитанных по скорости натекающего потока R_∞ , P_∞ и по среднemasсовой скорости паро-газовой смеси на поверхности капли R , P . Теплопроводность жидкости внутри капли считается достаточно высокой, так что поверхность капли рассматривается как изотермическая, а длина пробега излучения достаточно большой, чтобы распределение температуры в окрестности капли обеспечивалось молекулярной теплопроводностью и конвекцией. Для медленно испаряющейся капли ($R \ll 1$) первый член двучленного разложения по параметру R_∞ силы сопротивления согласуется с формулой Адамара — Рыбчинского.

22 V 1972. Е. У. Репик (Москва) *Исследование влияния градиента давления на структуру турбулентного пограничного слоя.*

Рассмотрены вопросы влияния продольного градиента давления на распределение скорости в турбулентном пограничном слое на гладкой и шероховатой поверхности. Исследовано влияние градиента давления на значение допустимого числа Рейнольдса, шероховатости, а также влияние предыстории развития пограничного слоя на его характеристики при $dP/dx \neq 0$. Приводятся новые опытные данные по исследованию явления «реверса» (обратного перехода) в турбулентном пограничном слое при глубоких отрицательных градиентах давления, раскрывающие механизм этого перехода. Исследованы периодические явления в пристеночной области турбулентного пограничного слоя (срыв вихрей со стенки) и установлена взаимосвязь между частотой срыва вихрей и характером течения в пограничном слое.

30 X 1972. Ю. П. Гупало, Ю. С. Рязанцев (Москва) *Диффузия и теплообмен сплошной среды с отдельной частицей.*

Рассматривается несколько задач тепломассообмена движущейся сферы с потоком вязкой несжимаемой жидкости. Принимается во внимание химическая реакция на поверхности сферы. Предполагается, что число Рейнольдса, включающее в качестве масштаба радиус сферы, имеет конечные значения порядка единицы, в то время как число Пекле либо порядка единицы, либо очень велико. Исследованы следующие случаи тепломассообмена сферической частицы или капли с потоком: 1. Сферическая жидкость или твердая частица в потоке жидкости ($Re \gg 1$); 2. Случай 1 для газа ($Pe \sim 0(1)$); 3. Задача о поле температуры, индуцированном химической реакцией первого порядка, протекающей на поверхности сферы, движущейся с постоянной скоростью ($Pe \sim 0(1)$); 4. Сферическая частица в однородном сдвиговом потоке ($Re \gg 1$). Решение задач 1 и 4 получены в приближении диффузионного пограничного слоя, задачи 2 и 3 решены методом сращиваемых асимптотических разложений по числу Пекле, при этом число Прандтля (или Шмидта) входит в решение задач 2 и 3 как параметр. Полученные результаты показывают зависимость распределения температуры (концентрации) и потоков тепла (массы) от числа Рейнольдса (в задачах 1—3) и от интенсивности однородного сдвига (задача 4).

А. М. Головин (Москва) *Движение пузырьков в вязком потоке*

Рассматривается движение жидкости, обтекающей сферический газовый пузырь при различных числах Рейнольдса. При $R < 1$ для стационарного течения методом сращиваемых асимптотических разложений рассчитывают сопротивление и диффузионный поток на поверхность пузыря. Расчет силы сопротивления для нестационарного движения при $R \ll 1$ приводит к формуле, которая в случае скачкообразного изменения скорости пузыря от нуля до некоторого постоянного значения, не имеет особенностей типа $1/\sqrt{t}$, а мгновенно принимает значение, совпадающее с формулой Левича. Тот же результат получается при $R \gg 1$ на временах недостаточных для установления пограничного слоя. Для расчета силы сопротивления предлагается использовать метод сращивания асимптотических разложений, который в случае, когда $R^{1/2} \gg 1$, позволяет получить решение в окрестности тыльной точки.

31 X 1972. М. Н. Коган (Москва) *О течении газа вблизи нагретых частиц.*

Показано, что в течениях с числами Рейнольдса $Re \leq 0(1)$ при $Kn = \lambda/L \ll 1$ (λ — длина пробега молекулы, L — характерный размер течения) и градиентах температуры $\Delta T/T$ или концентрациях $\Delta n_i/n_i$ порядка единицы в уравнениях движения некоторые из барнеттовских членов оказываются того же порядка, что и у Навье — Стокса. Эти дополнительные члены описывают тепловые или концентрационные на-

пряжения в газе, обуславливающие новый тип конвекции, возникающей при отсутствии поля сил. Приведены примеры конвекции. Рассмотрена классическая задача Стокса об обтекании нагретой сферы при $Re \ll 1$. Показано, что решение, получаемое обычно в рамках уравнений Навье — Стокса, существенно отличается от решения, получаемого с учетом необходимых дополнительных членов.

Рассмотрены граничные условия для уравнений газодинамики при наличии реакции на поверхности. Показано, что в ряде случаев установление таких условий и расчет скоростей гетерогенных реакций или испарения невозможны без решения кинетического уравнения Больцмана в кнудсеновском слое. Даны примеры соответствующих решений при сильном испарении или конденсации.

Ю. И. Яламов (Москва) *Теория термо- и диффузиофореза.*

Рассмотрен ряд задач о термофорезе умеренно крупных нелетучих и летучих аэрозольных частиц, капель растворов в однокомпонентных газах и бинарных газовых смесях, а также о диффузиофорезе нелетучих частиц и однокомпонентных летучих капель. Предложен гидродинамический подход к решению задач, заключающийся в интегрировании системы линеаризованных уравнений гидродинамики вязкой среды и уравнений диффузии и теплопроводности. Граничные условия на поверхности аэрозольной частицы учитывают конечность ширины слоя Кнудсена по сравнению с радиусом самой частицы. Анализ конечных результатов скоростей показал существенное влияние числа Кнудсена λ/R (λ — длина пробега газовых молекул, R — радиус аэрозольной частицы) на скорости термо- и диффузиофореза. Скорость термофореза чувствительна к отношению теплопроводности газа к теплопроводности частицы. Для летучих частиц скорости больше, чем для летучих за счет дополнительного эффекта, связанного с фазовым переходом на поверхности частицы.

1 XII 1972 В. М. Волощук (Обнинск) *Броуновская диффузия аэрозольных частиц.*

Показано, что уравнение Фоккера — Планка заведомо неприменимо, если плотность вещества в частицах меньше или порядка плотности несущей среды. Получены и решены при некоторых предположениях моментные уравнения для функции распределения в фазовом пространстве. Показано, что в гидродинамическом приближении уравнение для концентрации имеет вид нелокального по времени уравнения конвективной диффузии, а не телеграфного уравнения, как предполагалось другими авторами. В фоккер-планковских системах в гидродинамическом приближении отсутствует стохастический резонанс Серфа.

22 XII 1972 В. И. Найденев (Москва) *Асимптотические методы решения задач о движении вязкой жидкости при наличии теплопередачи.*

Для решения задач о теплообмене при движении вязкой несжимаемой жидкости в плоской трубе предложен метод последовательных приближений, заключающийся в разложении функции тока и температуры в ряд по степеням параметра, характеризующего зависимость вязкости от температуры. На стенках трубы считаются выполненными граничные условия первого и второго рода. Для расчета последующих приближений применяются собственные значения и собственные функции нулевого приближения. Рассмотрен вопрос о сходимости указанного процесса.

Технический редактор Э. Ф. Бунова

Сдано в набор 17/I-1973 г.	T-05319	Подписано к печати 29/III-1973 г.	Тираж 1885 экз.
Зак. 1614	Формат бумаги 70×108 ¹ / ₁₆ .	Усл. печ. л. 16.8	Бум. л. 6
			Уч.-изд. л. 18,3

2-я типография издательства «Наука». Москва, Шубинский пер., 10