

Уравнения А. Вайнштейна аксиально симметрической потенциальной теории обобщаются на случай произвольной p -характеристики $p(y)$ и называются уравнениями обобщенных осесимметричных течений. При p -характеристике $p(y) = y$ эти уравнения описывают установившееся осесимметричное течение идеальной жидкости.

Решения уравнений для потенциала скорости Φ и функции тока ψ при различных p -характеристиках связаны между собой соотношением, носящим название обобщенного принципа соответствия, частный случай которого при $p(y) = y^n$ был указан Вайнштейном.

Фундаментальные решения уравнений обобщенных осесимметричных течений гидродинамически интерпретируются как точечный источник и точечный вихрь. Для построения точечного источника необходимо решить неоднородное уравнение, в правой части которого записывается двумерная δ -функция Дирака. Решение этого неоднородного уравнения можно представить в символической форме при помощи интегрального оператора L^{-1} , являющегося обратным дифференциальному оператору L . Применяя метод разложения произвольной функции по собственным функциям дифференциальных уравнений второго порядка, можно в некоторых частных случаях построить точечный источник. С использованием принципа соответствия Вайнштейна решается задача об обтекании трехмерного тела вращения.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В 1966 г.

В соответствии со своим назначением Научный совет по механике жидкостей и газов при Отделении механики и процессов управления АН СССР (председатель — академик Л. И. Седов, заместитель председателя — академик В. В. Струминский) направлял и координировал основные научные исследования по гидродинамике.

Были проведены заседания бюро Совета по уточнению пятилетнего плана научно-исследовательских работ в области гидромеханики в свете решений XXIII съезда КПСС и с рассмотрением предложений по реализации и внедрению в народное хозяйство научно-технических достижений в области механики жидкостей и газов.

Совет активно участвовал в проходившем в августе 1966 г. Всемирном математическом конгрессе, провел (совместно со Всесоюзным нефтегазовым институтом) научную сессию по вопросам гидромеханики нефти и газа, а также (совместно с Институтом гидродинамики и Вычислительным центром СО АН СССР) всесоюзное совещание по неустановившимся потокам жидкости и газа в руслах и трубопроводах. Совет проводит подготовку (совместно с Национальным комитетом СССР по теоретической и прикладной механике) к проведению юбилейной научной конференции по итогам развития механики в СССР за 50 лет, а также (совместно с Советом по проблемам гидродинамики при АН УССР) Всесоюзного симпозиума по проблемам турбулентных течений жидкости и газа.

Ниже даются краткие обзоры сессии и совещания, прошедших в 1966 г.

Научная сессия по гидромеханике нефти и газа

Сессия состоялась 25 и 26 апреля в Москве.

Сессия ставила своей задачей установление важнейших направлений исследований по вопросам теории и практики разработки нефтяных и газовых месторождений, подземного хранения газа, а также связанных гидромеханических проблем.

В работе сессии приняло участие более 250 специалистов, представляющих различные научно-исследовательские и высшие учебные заведения Советского Союза.

В кратком вступительном слове А. И. Крылов указал на большие задачи, которые стоят перед подземной гидромеханикой, в связи с тем, что все стадии извлечения нефти должны быть подчинены требованиям технологической целесообразности и экономической оптимальности. Главная особенность новой технологической основы разработки нефтяных месторождений — комплексный метод расчета, при котором должны быть использованы результаты нефтегазовой геологии, подземной гидродинамики и экономики нефтедобычи. В последнее время научно-исследовательские работы были направлены на максимальное приближение решения задач к реальным условиям залегания и извлечения нефти и на осуществление более полной и эффективной нефтедобычи. При этом нашли широкое применение методы поддержания пластового давления, главным образом в виде законтурного, а затем и внутриконтурного заводнения. В ближайшие годы планируется существенное увеличение добычи нефти, в связи с чем перед подземной гидродинамикой встает ряд новых сложных проблем.

В докладе Л. А. Галина и В. Н. Николаевского (Теория фильтрации как раздел механики сплошных сред) речь шла об исходных положениях этой науки, которую можно рассматривать как область механики гетерогенных сред. Согласно феноменологическому подходу (обычному для механики сплошных сред) гетерогенная среда заменяется моделью двух или нескольких взаимопроникающих фаз, каждая из

которых характеризуется осредненными по пространству параметрами. В связи с запросами прикладных наук к настоящему времени подробно рассматривались различные частные модели, например (в теории упругого режима фильтрации) о сжимаемости скелета пористой среды, а также жидкости или газожидкостной смеси, заполняющей поровое пространство. С математической точки зрения в теории фильтрации имеются две категории задач. В одном случае исходные данные вполне определены, что обычно достигается в результате некоторой схематизации; задачи подобного рода могут быть охарактеризованы как детерминистические. В другом случае исходные условия определены неполностью; такие задачи могут быть названы индетерминистическими и для их решения целесообразно применять статистические методы.

Доклад Ю. П. Борисова был посвящен задачам разработки нефтяных месторождений платформенного типа. Эти месторождения характеризуются сравнительно малой мощностью (толщиной) продуктивных пластов, большими размерами нефтяных залежей в плане, незначительными углами наклона нефтяных пластов по отношению к горизонталю и, как правило, отсутствием тектонических нарушений, но большой изменчивостью гидродинамических свойств. Разработка этих месторождений обычно ведется с применением искусственного воздействия на нефтяные пласты путем законтурного или внутриконтурного заводнения. Докладчик сформулировал основные задачи подземной нефтяной гидротехники, возникающие при решении вопросов теории и практики разработки таких месторождений: определение основных гидродинамических характеристик процесса фильтрации в пласте в случае, когда его параметры с той или иной степенью детальности известны (прямые задачи подземной гидромеханики); определение значений параметров нефтяных пластов по данным результатам фильтрации (обратные задачи подземной гидромеханики); определение оптимальных условий осуществления процесса разработки. При решении всех задач необходимо учитывать реальную неоднородность пласта и особенности физико-химических процессов, происходящих в пористой среде. Больших результатов можно ожидать от применения методов теории вероятности.

Доклад М. Т. Абасова был посвящен вопросам гидродинамических исследований, связанных с разработкой газонефтяных и газоконденсатных месторождений. Были сообщены усовершенствованные методы расчета фильтрации газированной нефти и ее вытеснения водой, а также решения некоторых задач фильтрации газоконденсатной смеси. В докладе приведен ряд решений автоматизированных задач по вытеснению одной жидкости другой из неоднородного по проницаемости пласта, в одномерной постановке.

М. Д. Розенберг и А. К. Курбанов рассмотрели ряд современных вопросов гидромеханики нефти в реальных условиях нефтяных пластов. Показано, что некоторые важные особенности процесса вытеснения нефти водой, связанные, в частности, с действием капиллярных сил, невозможно объяснить на основании существующей теории. Актуальна также разработка гидродинамических методов расчета процесса течения нефти и воды в так называемых водоплавающих месторождениях. В докладе рассматривались вопросы фильтрации многокомпонентных систем, в частности, в связи с вопросами рациональной разработки залежей газоконденсата. Для успешного применения тепловых методов воздействия на пласт (внутрипластовое горение, закачка горячей воды и пара) необходимо уметь правильно рассчитывать тепловые поля в различных смесях жидкостей и газов в нефтяных пластах.

Проблемам течения жидкостей в трещиноватых и неоднородных пластах был посвящен доклад Ю. П. Желтова. Докладчик указал, что реальные нефтяные пласты характеризуются неоднородным строением, а также могут быть разбиты густой сеткой соединяющихся между собой трещин. Эти обстоятельства изменяют механизм течения в пластах нефти, воды или газа. Обсуждались проблемы, связанные с влиянием капиллярных сил на процесс движения жидкостей в этих пластах.

В докладе Ф. А. Требина, Б. Б. Лапука, С. Н. Бузинова, К. С. Басниева и С. Н. Закирова были рассмотрены гидродинамические проблемы разработки газовых и газоконденсатных месторождений. В настоящее время разработка газовых месторождений характеризуется относительно высокими темпами отбора газа из месторождений, ростом глубины вновь открываемых газовых и газоконденсатных месторождений и увеличением числа газоконденсатных залежей. В докладе были рассмотрены способы решения задач о притоке газа к системе скважин в пластах произвольной формы при различных граничных условиях. Излагались результаты аналитических исследований, методика решения этих задач на ЭВМ и проблемы, связанные с электромоделированием.

В настоящее время возникает задача разработки газовой залежи в неоднородном пласте при наличии водонапорной системы. Открытие крупных газоконденсатных месторождений выдвигает задачу исследования фильтрации газоконденсатных смесей с учетом фазовых превращений.

Доклад И. А. Чарного был посвящен гидродинамическим задачам, связанным с сооружением подземных хранилищ газа в водоносных пластах. Эти хранилища,

представляющие значительные преимущества по сравнению с наземными резервуарами, должны осуществлять компенсацию сезонной неравномерности потребления газа крупными промышленными центрами. При использовании для сооружения хранилищ водоносных пластов с достаточной герметичной кровлей, в особенности горизонтальных пластов, возникает ряд новых задач о движении и равновесии газового объема в водонасыщенной пористой среде. Докладчик сообщил решения задач движения границы раздела газа и воды при произвольном законе закачки и отбора газа, через одну скважину или цепочку скважин; изменения границы подземного газохранилища при циклических закачках и отборах газа; нагнетания газа в бесконечный неоднородный по проницаемости пласт, причем принимается во внимание образование зоны, в которой перемещается смесь воды и газа.

Доклад **Е. М. Минского** был посвящен актуальным проблемам разработки газовых месторождений. До 1953 года, пока добыча газа была относительно невелика, в подземной газовой динамике решались в основном простейшие, в ряде случаев одномерные, задачи. Большое число новых задач возникло в последнее время в связи с открытием новых крупных месторождений и необходимостью расчета распределения давления в залежи, изменяющегося во времени в зависимости от количества и расположения газовых скважин и распределения отбора газа между ними. В ряде случаев расчет оказывается весьма трудоемким, поэтому развиваются приближенные аналитические методы и метод электроаналогий. Задача о водонапорном режиме газовых месторождений заключается в расчете продвижения в залежь воды из замкнутого водного бассейна.

Большой интерес представляет изучение движения газа и воды в пластах с существенно неоднородными характеристиками. Учет влияния макронеоднородностей может быть произведен методом конечных разностей и с помощью электроаналоговых машин. Для учета микронеоднородностей необходимо развивать статистические методы исследования. Важно также создание методов расчета разработки на основании информации, получаемой при исследовании относительно малого числа разведочных скважин.

Доклад **А. Х. Мирзаджанзаде** и **А. Ф. Касимова** был посвящен гидродинамическому исследованию процессов проводки скважин и нефтедобычи. В связи с этими вопросами возникает необходимость решения ряда технических задач о движении вязко-пластических жидкостей. Приближенно рассматривались простейшие нестационарные течения в трубах, движение цилиндрических тел, замещение одной жидкости другой. Описаны экспериментальные исследования равновесия тиксотропных вязко-пластических жидкостей, а также фильтрации этих жидкостей в пористой среде, причем получен обобщенный закон Дарси. В докладе сообщены результаты исследований теплообмена при движении вязко-пластических жидкостей, а также движения твердых частиц в потоке вязкой жидкости в вертикальных трубах.

В решении сессии были перечислены основные направления актуальных теоретических, лабораторных и натурных исследований по гидромеханике нефти и газа.

Всесоюзное совещание по неустановившимся потокам жидкости и газа в руслах и трубопроводах

Совещание было проведено с 29 ноября по 3 декабря 1966 г. в Новосибирске.

В совещании приняли участие около 120 ученых и специалистов из ряда научно-исследовательских институтов АН СССР, СО АН СССР, АН союзных республик, отраслевых институтов, некоторых СКБ, университетов и учебных институтов, а также ведущих научно-исследовательских и проектных организаций страны, работающих в этой области.

На совещании рассматривались в основном вопросы применения современных методов вычислительной математики и техники к расчету различных задач неустановившегося движения жидкостей и газов. Работало три секции: открытых потоков, напорных потоков и газовых потоков. На пленарных заседаниях подводились итоги развития соответствующего раздела науки, а также излагались решения наиболее важных частных задач.

В докладе **Н. Н. Яненко** был произведен обзор схем интегрирования нелинейных гиперболических и параболических уравнений применительно к задачам одномерной гидродинамики. Рассмотрены существующие разновидности численных методов искусственной вязкости и сквозного счета, схемы детального описания течений, неявные схемы. Обсуждена связь одномерных методов с двумерными, отмечены метод расщепления и метод фиксированных частиц.

Н. А. Картелишвили перечислил некоторые новые аспекты проблемы неустановившегося течения в напорных гидротехнических сооружениях.

Изучение процесса закрытых регулирующих органов гидротурбин показывает, что случайный характер законов регулирования, а также других факторов, определяющих величину максимума гидравлического удара, заставляет ставить задачу не о максимуме внутреннего давления в напорных трубопроводах ГЭС, а о распределе-

нии вероятностей этого максимума. Отмечена возможность построения уточненной теории гидравлического удара, описывающей работу тонкостенных металлических трубопроводов, опертых на кольца жесткости. Устойчивость стационарного гидравлического режима в напорной системе ГЭС рекомендуется рассматривать совместно с общей задачей об устойчивости энергетической системы как целого.

В докладе Г. В. Логвиновича (Гидродинамика течений со свободными границами) рассматривалось движение тел в воде с большими скоростями, происходящее при развитой кавитации. Обсуждены важные направления исследований — точное решение осесимметричных и пространственных задач, создание рациональных теорий уноса газа из каверн и анализ их устойчивости. Другая актуальная проблема — ударный вход тел в жидкость. Большое практическое значение имеют также плоские и пространственные задачи движения подводных крыльев, в том числе при развитой кавитации. В приложении к докладу был показан фильм «Физика кавитации», иллюстрирующий обтекание тел при развитой кавитации и вход тел в воду.

О. Ф. Васильев дал обзор современного состояния теории неустановившихся потоков в открытых руслах. Наиболее развита одномерная теория русловых течений без разрывов (явления типа паводков). Разработаны различные методы решения (метод характеристик, метод мгновенных режимов, явные и неявные методы сеток) с применением цифровых и аналоговых ЭВМ.

В задачах о русловых течениях с разрывами (прерывными волнами) были применены численные методы искусственной вязкости, характеристик с выделением разрыва и сквозного счета. Успешно используются предельные обобщенные решения уравнений, записываемых в форме законов сохранения, а также специальные подвижные координатные сетки. Применение новых разностных схем, в особенности неявных, сильно продвинуло расчет течений в сложных системах каналов. Относительно слабо развивается теория неустановившихся потоков в размываемых руслах. Здесь преобладают упрощенные теоретические подходы, недостаточны натурные и экспериментальные исследования. Актуальна также задача разработки новых методов решения двумерных задач гидравлики открытых русел (в плане). Применение современных ЭЦВМ создает возможность для решения сложных инженерных задач этого рода. В последние годы повысился интерес к вопросу о сопротивлении при неустановившемся движении. С помощью численных методов решен ряд задач о нестационарных процессах в камерах шлюзов и наклонных судоподъемников и в подходных каналах судоводных сооружений, с учетом совместных колебаний воды и плавающих тел.

Доклад С. М. Шугрина и Э. В. Шугриной был посвящен расчету сложных систем русел и каналов. Каждая такая система рассматривается как одномерный комплекс, состоящий из множества ориентированных отрезков и точек с заданными связями. На этом комплексе рассматривается система уравнений Сен-Венана, для решения которой применяется неявная разностная схема с «явным» счетом границ, устойчивая при любых отношениях шагов по времени и пространству. По составленной программе могут рассчитываться речные сети, дельты, ирригационные системы. Эта же схема может быть использована при расчете неустановившегося движения газа в разветвленной системе газопроводов, включающей также и кольца.

Л. С. Кучмент и Н. С. Нечаева доложили оперативную схему прогноза паводочной волны на крупной речной системе, разработанную для примера сложной речной системы Волга — Кама — Вятка, имеющей более двадцати входных створов. Эта схема реализована на современной ЭЦВМ и используется для ежедневного выпуска прогнозов в период прохождения паводков. Подбор необходимых для расчета эмпирических параметров гидрологической и морфометрической информации удобно производить с помощью электронных моделирующих машин, используя наблюдения за водным режимом.

В докладе Н. Н. Яненко, В. Д. Фролова и В. Е. Неуважаева (О применении метода расщепления для численного расчета движений теплопроводного газа в неортогональных криволинейных координатах) предлагается алгоритм численного решения задачи об осесимметричном движении с учетом теплопроводности в неоднородных средах, основанный на применении метода расщепления (дробных шагов). Решение двумерной задачи сводится к последовательности одномерных расчетов.

Применяется смешанный способ описания движения, когда одно семейство координатных линий, совпадающее с границами раздела — лагранжево, а другое — эйлерово. Это позволяет следить за границами раздела и просто вычислять протекание вещества в слоях. Реализуются неявные разностные схемы, позволяющие вести расчет с достаточно крупным шагом по времени.

В докладе О. Ф. Васильева и А. Ф. Воеводина (Газотермодинамический расчет магистральных газопроводов) рассматривается задача о неустановившемся одномерном движении весомого сжимаемого газа с учетом тепло- и массообмена с внешней средой, а также реальных термодинамических свойств газа, и дается ее численное решение методом сеток. Приводятся примеры расчета нестационарного движения реального газа с использованием уравнения состояния в форме Берглю.

Е. М. Минский, И. Е. Ходанович, Б. Л. Кривошеин, М. Г. Хубларян и В. П. Радченко выступили с докладом о расчете нестационарных неизотермических движениях реальных газов в трубопроводах. В предложенном методе расчета пренебрегается изменением скорости течения и геометрической высоты; принят закон теплообмена в форме Ньютона; реальный газ следует уравнению Бертоля. Уравнения задачи решаются численно по явной разностной схеме на БЭСМ-2М.

На заседаниях секции открытых потоков было заслушано 26 докладов.

Группа докладов от Института гидродинамики СО АН СССР была посвящена разработке численных методов расчета распространения волн в открытых руслах.

Метод расчета распространения прерывных волн был описан в докладе **О. Ф. Васильева, М. Т. Гладышева и В. Г. Судобичера**. Запись уравнений движения в форме законов сохранения и использование дивергентной разностной схемы позволили производить расчет как с выделением, так и без выделения разрывов.

Расчет движения волны по сухому руслу в рамках одномерной теории мелкой воды с использованием подвижной сетки дан **С. М. Шургиным и В. Г. Судобичером**. Влияние нестационарности на гидравлическое сопротивление при разливе воды в сухое русло рассмотрено **В. И. Квоном**.

В двух докладах **М. С. Грушевского** были изложены результаты выполненных исследований неустановившегося движения воды в реках с целью получения рекомендаций по расчету в условиях естественных русел. Исследования включали широкий анализ натуральных наблюдений и численный эксперимент на ЭВМ как для конкретных объектов, так и для гипотетических русел простейшей формы.

Л. С. Кучментом рассмотрена обратная задача неустановившегося движения воды в реке о нахождении гидрографа верхнего створа по гидрографу нижнего створа при условии, что связь между этими гидрографами достаточно точно описывается интегралом Дюамеля. Аналогичная задача в упрощенной постановке решается **К. Х. Овсепяном и Р. С. Аветисяном** на ЭВМ непрерывного действия.

Об опыте применения ЭВМ для массовых расчетов неустановившегося движения воды в бьефах гидростанций при суточном регулировании их мощности сообщил **Б. Л. Историк**.

Ряд докладов был посвящен влиянию нестационарности на касательное напряжение и кинематическую структуру открытого потока: **О. Ф. Васильева, В. И. Квоном, К. В. Гришанина, Е. В. Еременко и В. М. Ляхера**.

В секции напорных потоков было заслушано 10 докладов. Часть докладов была посвящена вопросам устойчивости, нестационарным и переходным процессам в напорных системах и блоках гидроэлектростанций. **Н. Ф. Манджвидзе** произведен анализ условий устойчивости стационарных режимов гидроэлектростанций с длинными уравнительными резервуарами на отводящих напорных туннелях. **Г. И. Нудельманом** описана методика расчета собственной частоты сложной системы напорных водоводов ГЭС на основе волнового уравнения гидравлического удара.

Ю. С. Васильевым и В. И. Виссарионовым предложен метод моделирования в исследованиях неустановившегося движения, осуществляемый путем подключения к гидравлической установке аналоговой ЭВМ. Применение метода осреднения для численного решения трехмерной задачи на примере течения в осевой турбомашине дано **Я. А. Сироткиным**. Неустановившееся движение в системах гидропривода рассмотрел **А. К. Войнов**; некоторые результаты экспериментального исследования гидравлических сопротивлений при неустановившемся напорном движении были изложены **У. Р. Лийвом**.

В секции газовых потоков было заслушано 9 докладов, большая часть которых была посвящена развитию численных методов расчета на ЭВМ неустановившегося движения газов по трубопроводам. В докладе **В. Ф. Куропатенкова, Б. И. Потапкина, А. Т. Сапожникова** рассматривался разностный метод расчета неустановившихся течений сплошной среды и его применение к задачам с фазовыми переходами (испарением или конденсацией), при наличии ударных волн и волн разрежения.

Метод дробно-линейной аппроксимации для расчета на ЭЦВМ неустановившегося движения в системах трубопроводов предложен **Бутусовым Ю. М.** Метод инвариантного режима уравнений движения жидкости и газа в длинных трубопроводах — **М. Г. Сухаревым**.

М. А. Жидкова и Н. И. Снисаревский в своем докладе высказали мнение, что для систем газопроводов умеренной сложности целесообразно аналитическое решение линеаризованных уравнений неустановившегося движения газа в газопроводе, для более же сложных газовых систем наиболее эффективно электрическое моделирование. Некоторые аналитические решения задач неустановившегося движения жидкостей в трубопроводах даны в докладе **С. Н. Бузинова и Н. А. Карповой**.

В принятом решении совещание отметило, что работы, ведущиеся в научно-исследовательских институтах, необходимо продолжать в направлении развития, уточнения и широкой проверки методов расчета на различных конкретных объектах, расширяя фронт экспериментальных исследований. Намечены основные направления дальнейшего развития вопросов теории.