

FLOW-3D в проектировании машиностроительной гидравлики.

*Дарит Я.А., Куванов К.Е., Пузанов А.В., Холкин И.Н.
ОАО "СКБ ПА" г. Ковров, ОАО "КЭМЗ" г. Ковров.*

Машиностроительная гидравлика является современной отраслью машиностроения. Но до настоящего времени процесс проектирования гидравлики на 99 % опирался на эксперимент, в большой степени это так остается и сегодня.

Однако дальнейшее повышение качества проектирования при одновременном сокращении сроков возможно только при использовании современных компьютерных технологий.

Одни из ведущих предприятий России в области гидромашиностроения ОАО "СКБ ПА" и ОАО "КЭМЗ" (г. Ковров) в период 1997-2000 гг. предприняли усилия по переносу центра тяжести в проектировании с натурного экспериментирования на модельные исследования. Это стало возможным в связи с приобретением новых программных продуктов, и в частности, пакета FLOW-3D (Flow Science, Inc. www.flow3d.com), позволяющего моделировать гидродинамические течения на уровне близком к элементарному. При этом подходе удается одновременно охватывать как микро, так и макропроцессы.

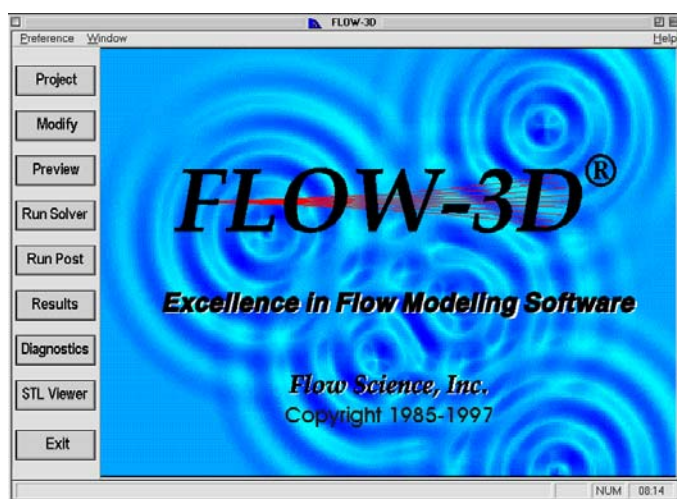


Рис. 1. Программа FLOW-3D

FLOW-3D является современным программным продуктом для анализа динамики жидкости и газа, включая тепловые эффекты, и применяется для математического моделирования ограниченных течений жидкости и течений со свободной поверхностью при турбулентном и ламинарном режимах, а так же газов в до звуковом и сверхзвуковом режимах.

Для описания объема моделирования FLOW-3D использует сетку в декартовых или цилиндрических координатах. Сложная геометрия моделируется с использованием метода FAVOR, где препятствия и перегородки заключаются в ортогональную сетку. Данный метод допускает независимое определение сетки и геометрии, т.е. геометрия может быть изменена без повторного определения сетки.

Мощный генератор сетки FLOW-3D прост в применении и способен создавать сложные сетки. Так как сетка определяется независимо для каждой из трех ортогональных координат, пользователь, как минимум, должен задать граничные координаты сетки и число ячеек в каждом направлении. Для более сложной сетки могут быть определены промежуточные плоскости сетки, также как и размер ячеек в определенных местах или количество ячеек между двумя точками. Промежуточные точки используются в основном для определения мест более высокой разрешающей способности. Примером использования промежуточных точек может служить модель внешнего течения, когда высокая разрешающая способность требуется вблизи интересующего объекта, с сеткой, расширяющейся от объекта.

В цилиндрических координатах ось «Z» является вращающейся осью системы, «X» становится радиальной координатой, а «Y» представляет азимутальный угол.

FLOW-3D позволяет рассчитывать как плоские, так и объемные модели потока. Для определения областей потока и препятствий в вычислительной сетке система поддерживает пять методов.

Первый метод - конструктор твердого тела FLOW-3D. Он базируется на таких примитивах как блоки, сферы, конусы, цилиндры и другие квадратичные формы, и является частью препроцессора. Данный метод может быть легко использован для создания большинства геометрий.

Второй метод описания области заключается в простом чтении файла с данными в дробных долях поверхностей/объемов, которые были сгенерированы в предыдущем расчете или с помощью другой программы.

Третий метод может быть использован для особо сложных форм. Данные, читаемые во FLOW-3D должны быть представлены в формате, разработанном для программы I-DEAS.

Четвертым методом известен как стереолитография или stl-формат. Stl-файлы используются в качестве входных для полностью автоматизированного и быстрого ввода геометрии объектов моделирования. Геометрия моделируемого объекта может быть подготовлена практически в любой системе трехмерного проектирования, например система Mechanical Desktop (Autodesk, Inc.).

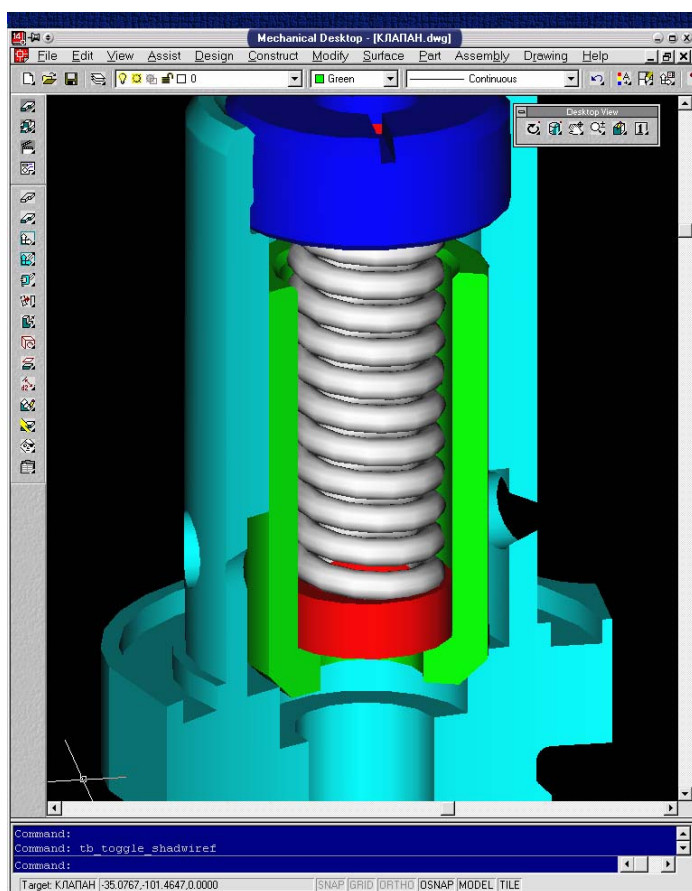


Рис. 2. Модель клапана, выполненная в программе Mechanical Desktop.

Пятый метод может быть использован для считывания исходных данных, представленных в формате системы ANSYS.

Для определения препятствий можно использовать как отдельно взятый метод, так и комбинацию методов.

Программа FLOW-3D состоит из четырех отдельных подпрограмм: препроцессора, главного процессора, постпроцессора и графического пакета. Препроцессор переводит входные параметры в полную численную модель начальных и граничных условий для главного процессора, упрощая тем самым работу пользователя по окончательной постановке задачи.

Препроцессор инициализирует свойства сплошной среды, начальные и граничные условия, устанавливает численные значения переменных, генерирует твердые тела и перегородки. Все исходные данные, определенные пользователем, читаются препроцессором в формате namelist. Некоторые исходные параметры имеют значение, определенное по умолчанию, тем самым,

позволяя пользователю определять только данные необходимые для решения конкретной задачи. Препроцессор производит логический контроль входных данных, и если это необходимо - предупреждает пользователя о некорректной постановке задачи.

Главный процессор включает в себя алгоритмы генерации численных решений в широком спектре физических условий. Кроме того, главный процессор контролирует величины критерия сходимости и временного шага, тем самым достигается наилучшая скорость и точность решения поставленной задачи.

Постпроцессор позволяет легко просматривать и манипулировать промежуточными и окончательными результатами вычислений. Математическая модель в главном процессоре строится по принципу модели с переменной структурой, так что части уравнений, описывающие различные физические эффекты вызываются только тогда, когда эти эффекты включены в решаемую задачу. Во время работы главный процессор выдает различную информацию о ходе расчета. Эта информация может быть использована для построения различных графических диаграмм, а так же использоваться как начальные условия для новых последующих вычислений. В этом случае большинство физических параметров может быть переопределено, что дает пользователю существенную гибкость в решении задачи.

Программа FLOW-3D включает различные математические модели потоков: нестационарные 1, 2-х или 3-х мерные уравнения Навье Стокса в декартовых или цилиндрических системах координат; модели сжимаемых и несжимаемых жидкостей; модель распространения звуковых волн; модель обтекания твердых тел; модель свободных и ограниченных течений; различные модели турбулентности; модель течения двухкомпонентной смеси с/без поверхностью раздела; не-Ньютоновы жидкости и многое другое.

Постпроцессор, используя ранее полученные данные, генерирует различные графические диаграммы. Векторные и контурные диаграммы строятся в заданных 1, 2-х и 3-х мерных видах и разрезах физического пространства. Постпроцессор имеет широкие цветовые возможности для отображения подчеркивания различных эффектов. Графики строятся для визуализации временной эволюции локальных и интегральных величин: компонентов скоростей, давлений, температур, сил и моментов, плотностей, концентраций энергии и много другого.

Постпроцессор может записывать данные вычислений в специальные файлы для ввода в иные программные пакеты, например для моделирования динамики твердых тел или структурного анализа.

Графический пакет предназначен для визуализации результатов моделирования. Пакет способен отображать графики различных временных функций, двухмерные и трехмерные диаграммы в сером или цветном изображении, а так же создавать данные необходимые для анимации.

Круг решаемых с помощью пакета FLOW-3D задач весьма широк. Решение каждого класса задач требует адаптации пакета под конкретную специфику.

Предприятия ОАО "СКБ ПА" и ОАО "КЭМЗ" (г. Ковров) специализируются на проектировании и производстве комплексных гидравлических приводных систем. Область использования этих систем весьма широкая: летательные аппараты, суда, наземный транспорт, станки и манипуляторы, энергетика, металлургия и т.д.

Такое широкое распространение гидравлических приводов связано с их фундаментальными свойствами, которые в свою очередь определяются свойствами жидкости – рабочего тела гидропривода (текучестью, практической несжимаемостью и др.). Современный гидравлический привод характеризуется большой удельной мощностью, малыми габаритами и весом, высоким быстродействием, точностью, бесступенчатым регулированием скорости исполнительных органов.

Комплексный гидростатический привод высокого давления включает в себя большое количество разнородных гидравлических машин, элементов гидроавтоматики, гидроарматуры. Некоторое представление о наборе элементов входящих в гидропривод можно получить из рис. 3.

Основные элементы гидропривода дорожно-строительной машины.

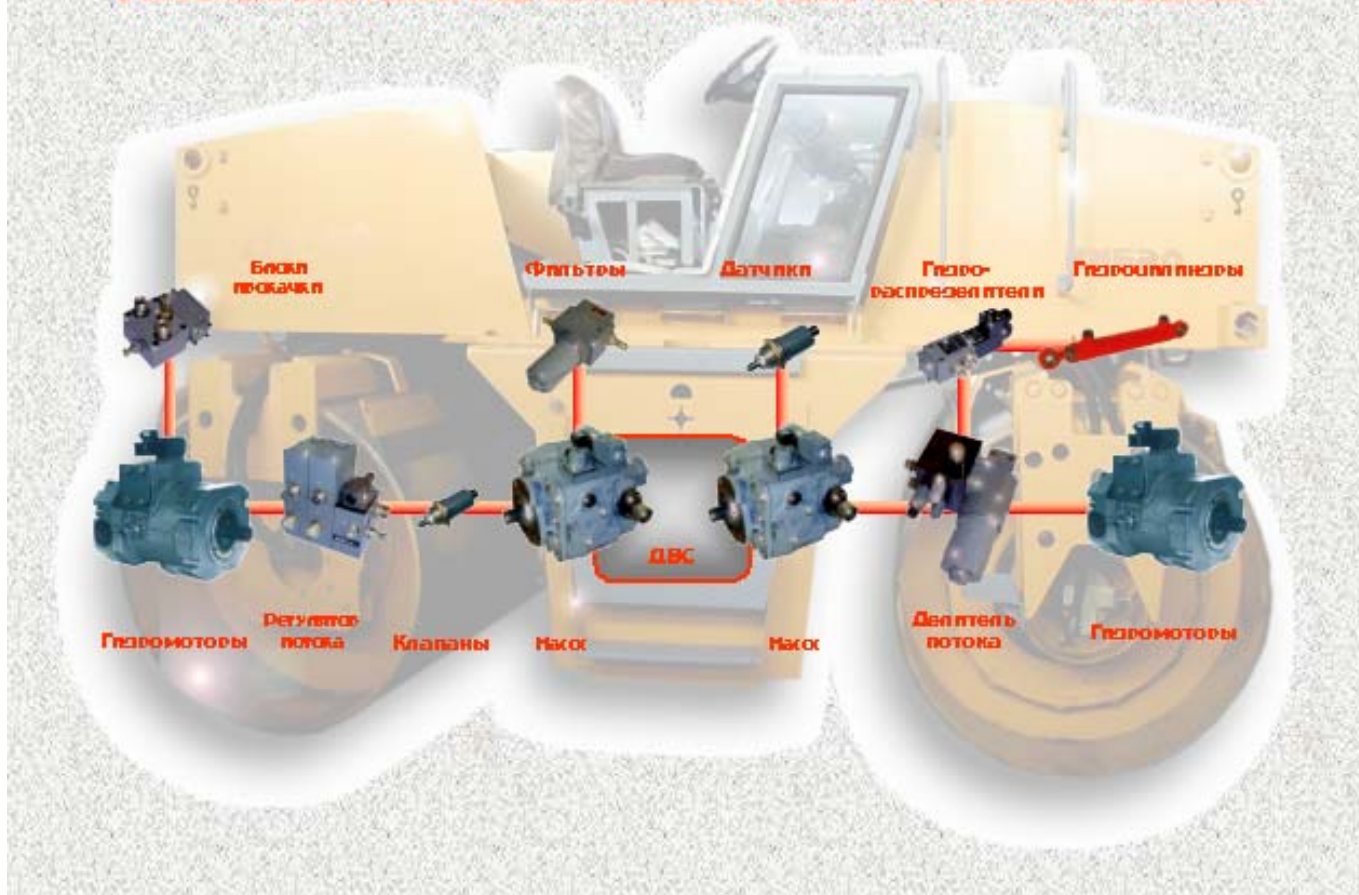


Рис. 3. Элементы гидростатического привода дорожного вибрационного катка.

Укрупнено все элементы гидропривода для удобства моделирования могут быть разбиты на несколько групп:

- гидравлические сопротивления (диссипаторы гидравлической энергии);
- устройства гидроавтоматики (регуляторы параметров потока жидкости);
- гидравлические емкости и индуктивности (интеграторы потоков и давлений);
- гидронасосы, гидромоторы, гидроцилиндры (гидромеханические и механогидравлические преобразователи);

Моделирование гидравлических сопротивлений.

Фундаментальным процессом, встречающимся в любом реальном гидравлическом устройстве, является рассеяние энергии при деформации потока жидкости в канале.

Эталоном качества моделирования этого процесса в любом гидроаппарате может служить моделирование течения жидкости через дроссельную шайбу. Сама по себе дроссельная шайба также используется в различных устройствах гидроавтоматики.

На рисунках представлены результаты моделирования течения маловязкой жидкости через дроссельную шайбу.

Как видно из рис. 4 перед дроссельной шайбой происходит торможение жидкости и вектор скорости направлен к оси потока. В результате имеет место сужение потока, его ускорение и резкое снижение давления. При внезапном расширении возникает вихреобразное движение жидкости, скорость потока падает и имеет место интенсивное рассеяние энергии потока (рис. 5). При этом давление практически не восстанавливается.

Ядро струи жидкости имеет трапециевидную геометрию, и эпюра скорости имеет параболический характер.

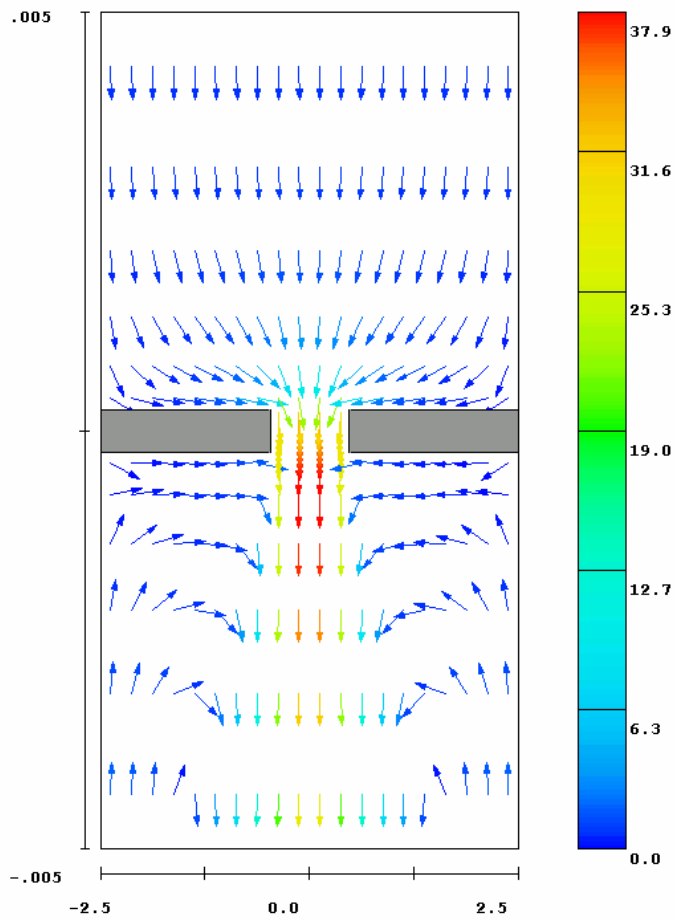


Рис. 4. Распределение скоростей жидкости по осевому сечению дросселя.

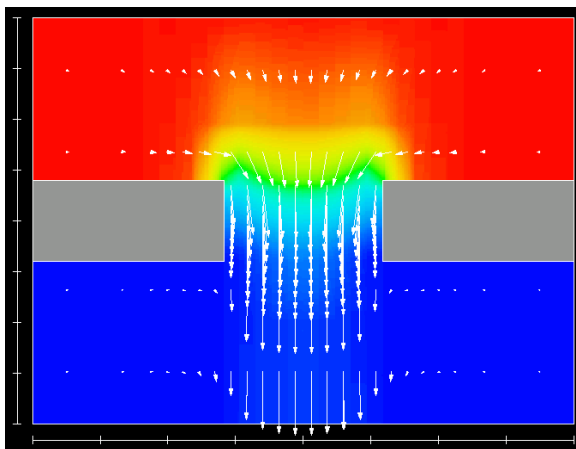


Рис. 5. Распределение давления жидкости во внутреннем канале дросселя.

Как видно на рис. 6 максимальная турбулиизация потока и диссипация энергии связаны между собой сложной зависимостью: так турбулиизация потока имеет место в ядре струи, а наибольшая потеря энергии происходит на кромках и в канале дросселя.

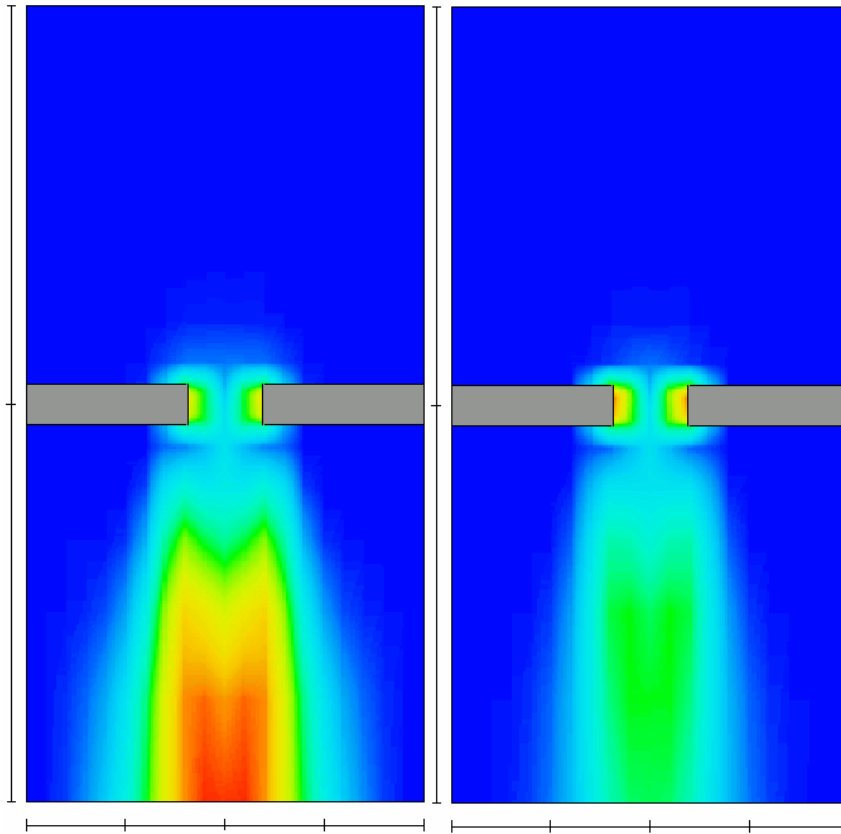


Рис. 6. Турбулентная энергия и диссипация энергии в дросселе.

Обобщенные характеристики дросселя представлены на рис. 7 в виде двух зависимостей: расходно-перепадной и коэффициента расхода как функции от числа Рейнольдса. Данные характеристики полностью совпадают с экспериментальными зависимостями.

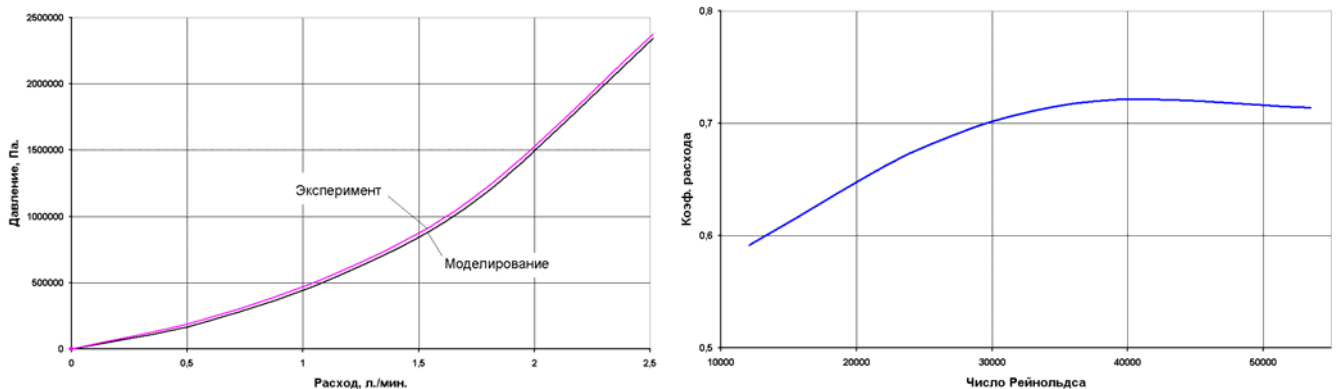


Рис. 7. Расходно-перепадная характеристика и функция зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса.

Для статических и динамических моделей различных гидроустройств используются зависимость выше представленных параметров от вязкости жидкости, шероховатости канала наличия газосодержания в жидкости и т.д.

На рис. 8 представлена аналогичная модель течения жидкости в трубопроводе и местном сопротивлении конфузorno-диффузornoго типа. При выбранных для расчета параметрах эпюра скорости в трубопроводе имеет трапецеидальный вид; градиент изменения скорости у стенки достигает максимума, но в целом, коэффициент неравномерности скорости по сечению канала близок к единице.

В конфузorno-диффузornoм сопротивлении, по сравнению с дроссельной шайбой, вихреобразование минимальное. Наименьшее давление имеет место в узкой части потока, затем давление частично восстанавливается.

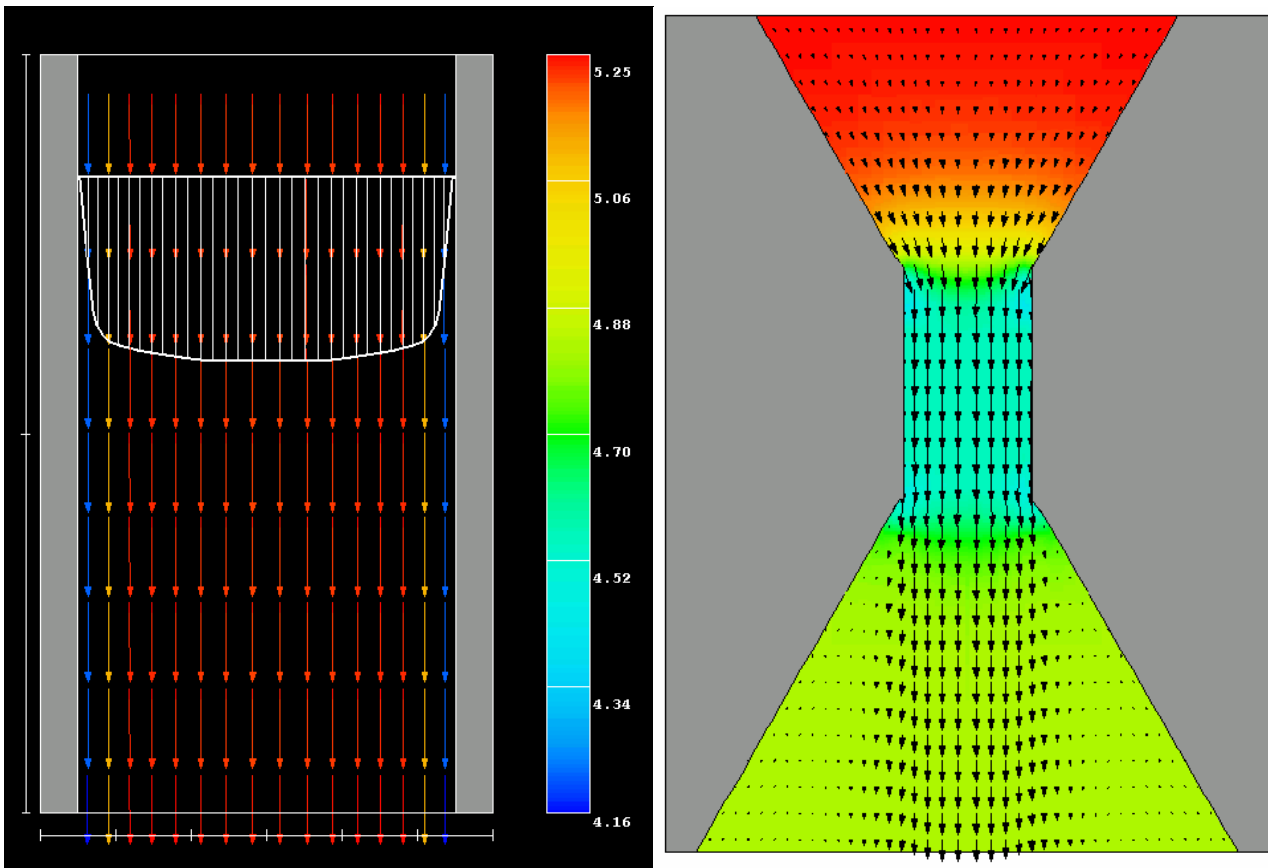


Рис. 8. Течение маловязкой жидкости через трубопровод и конфузorno-диффузорное сопротивление.

При адаптации пакета FLOW-3D для целей моделирования машиностроительной гидравлики высокого давления в статике и динамике в широком диапазоне температур, работающей на минеральных и синтетических маслах, ставилась задача учета свойств жидкости, характера поверхности каналов, наличия содержания газа в системе и т.д.

Аналогичные процессы имеют место во всех гидравлических устройствах.

Моделирование устройств гидроавтоматики.

Концепция расчетного комплекса для моделирования различных устройств гидроавтоматики, в котором использована программа FLOW-3D (трехмерная модель потока), графически представлена на рис 9.

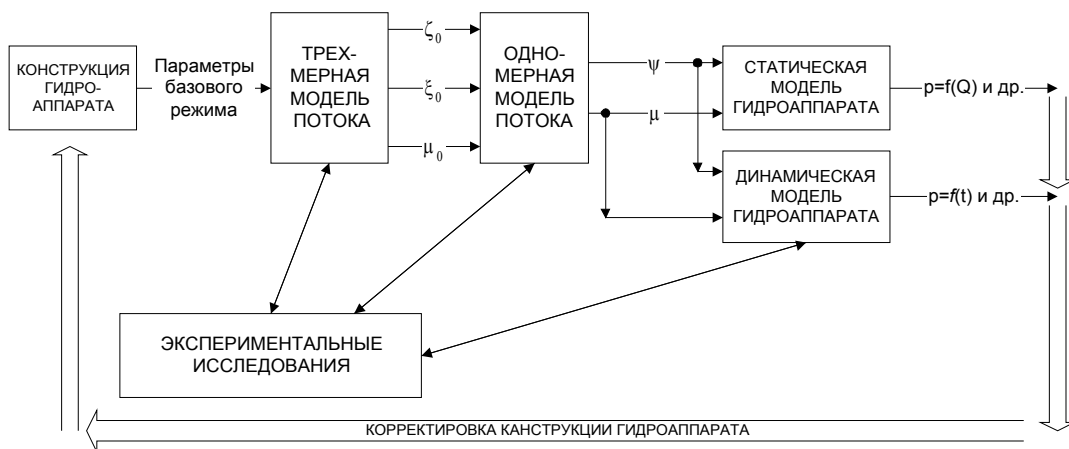


Рис. 9. Расчетный комплекс.

Подробная трехмерная модель, описывающая физические свойства жидкости, используется для расчета коэффициентов, как это показано выше на примере дроссельной шайбы. Такая модель получается весьма сложной и расчет с ее помощью каждой режимной точки требует больших

затрат машинного времени. Поэтому, назначение трехмерной модели целесообразно ограничить определением точных значений коэффициентов (коэффициента расхода μ_0 , коэффициента динамической силы ξ_0 , коэффициента полной силы ψ_0 действующей со стороны жидкости на затвор гидроаппарата, коэффициента относительных потерь напора вдоль линии тока ζ_0) для основного режима работы гидроаппарата.

Полученные в трехмерной модели потока значения коэффициентов используются для описания гидродинамических процессов в упрощенной одномерной модели, которая реализуется средствами других пакетов (динамического моделирования SIAM, Matlab/Simulink и т.п.). При этом рассчитываются основные параметры потока и серии коэффициентов μ , ξ , ψ , $\zeta(l)$ для разных режимов, т.е. для разных сочетаний таких параметров как величины входного и выходного давлений, высоты подъема затвора, газосодержания в жидкости и др.

Достоинство одномерной модели в том, что она позволяет оперативно выполнить большое количество расчетов – проводить модельные исследования.

Одномерные модели в предназначены для получения серий зависимостей коэффициентов расхода и коэффициентов сил, действующих со стороны жидкости на затворы гидроаппаратов от режимных и других параметров в широком диапазоне при приемлемой точности.

Располагая зависимостями для коэффициентов сил, коэффициентов расхода по известным уравнениям и алгоритмам можно рассчитывать статические и динамические характеристики гидроаппаратов в соответствующих моделях.

Пример характеристик рассчитываемых с помощью комплекса приведен на рис. 10 (применительно к клапану).

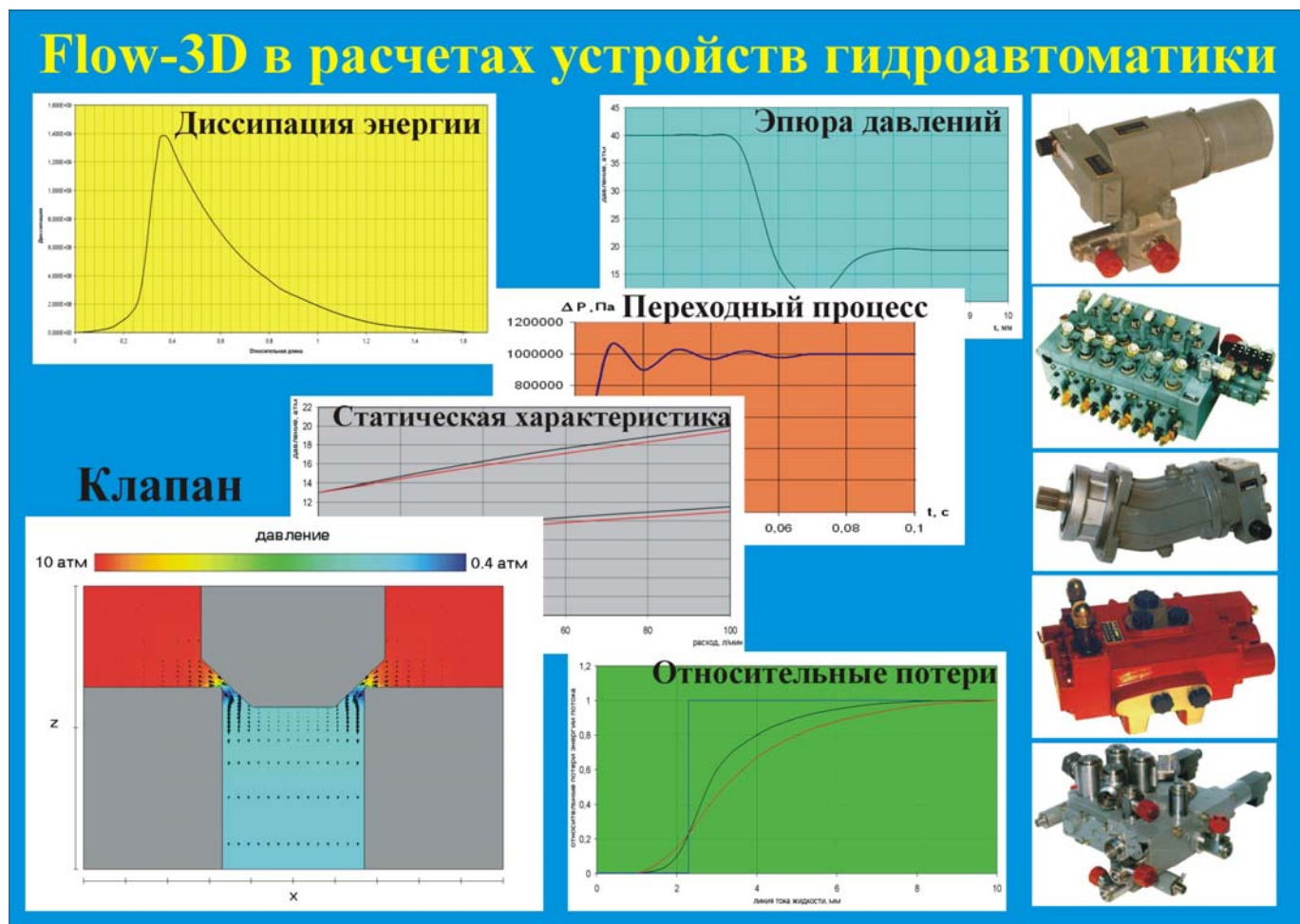


Рис. 10. Расчет течения жидкости через клапан и характеристики, выполненные в различных моделях гидроаппаратов.

Наиболее важным представляется выполнение расчета во FLOW-3D для определения сил, действующих со стороны потока жидкости на запорно-регулирующие элементы (ЗРЭ) пропорциональных распределителей. Такие расчеты позволяют выполнить конструкцию ЗРЭ таким образом, чтобы достигалось гидростатическая и гидродинамическая скомпенсированность

сил действующих на ЗРЭ, что в свою очередь обеспечивает высокие динамические свойства распределителей.

Проливка корпусных каналов устройств ГА на этапе проектирования позволило снизить непроизводительные потери напора в изделиях ОАО «СКБ ПА» и повысить энергетические характеристики гидросистем в целом.

Моделирование гидромашин.

Гидромашины являются наиболее сложными для моделирования элементами. С одной стороны это высоконагруженные силовые установки, преобразующие механическую энергию в гидравлическую и обратно, с другой – устройства автоматического регулирования, с третьей – насосы являются комплексом элементов находящихся друг с другом в сложном взаимодействии и во взаимодействии с другими элементами привода.

Круг расчетов выполняемых с помощью моделей гидромашин охватывает самые разные характеристики: статические, динамические, энергетические, прочностные, акустические, температурные, характеристики надежности и др.

Связь всех характеристик между собой и с конструкцией гидромашин осуществляется через характеристику рабочего процесса – индикаторную диаграмму - ИД (аналог характеристики “Цикл Карно” для двигателей внутреннего сгорания). Совокупность моделей ИД для всех поршней составляет базовую модель гидромашин. Базовая модель, оснащенная дополнительными процедурами, которые выбираются для решения задачи с конкретной спецификой (например, расчет энергетических характеристик), преобразуются в производную модель соответствующей группы. Степень детализации модели гидромашин связана с детализацией (уровнем) модели ИД. Уровень модели гидромашин определяется последовательным количеством вложений подструктур. Общая структура моделей гидромашин приведена на рис. 11.

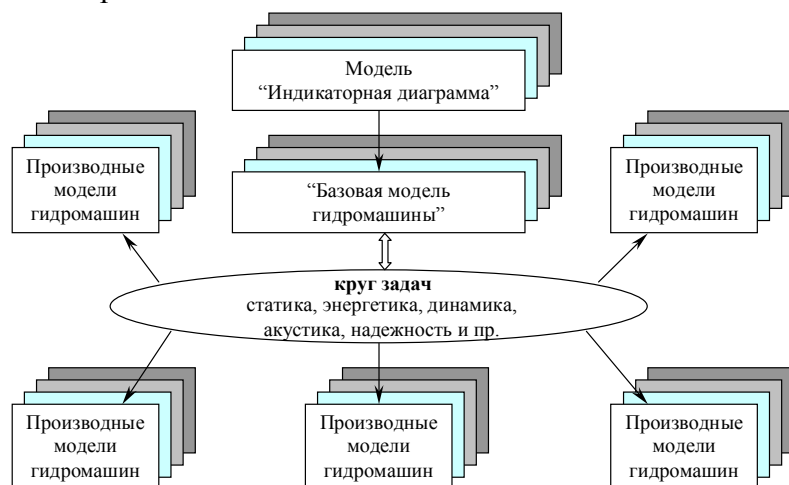


Рис. 11. Система моделей гидромашин.

Основу модели ИД составляют описание кинематики насоса, уравнения неразрывности потока в поршневой камере и характеристики расходов через зазоры, точные значения которых рассчитывается во FLOW-3D. На рис. 12 показаны основные зазоры в гидромашине. Здесь же показан пример расчета течения жидкости через гидростатическую опору.

Гидростатическая опора проектируется таким образом, чтобы поршень под действием давлений с одной и другой стороны оказался во “взвешенном” состоянии, исключая отрыв поршня от опоры с одной стороны и “металлический” контакт - с другой. Оптимум по зазору должен составлять 10-15 мкм. Причем эта величина должна автоматически поддерживаться при мгновенном изменении нагрузок, и скоростей. В этом случаи расчет требуемой точности может быть выполнен только с использованием программы моделирующей микро- и макропроцесс одновременно. Результатом моделирования во FLOW-3D является эпюра давлений (см. рис. 12) в масляном слое зазора, интеграл этих давлений по поверхности и рекомендации по ширине, длине и высоте зазора.

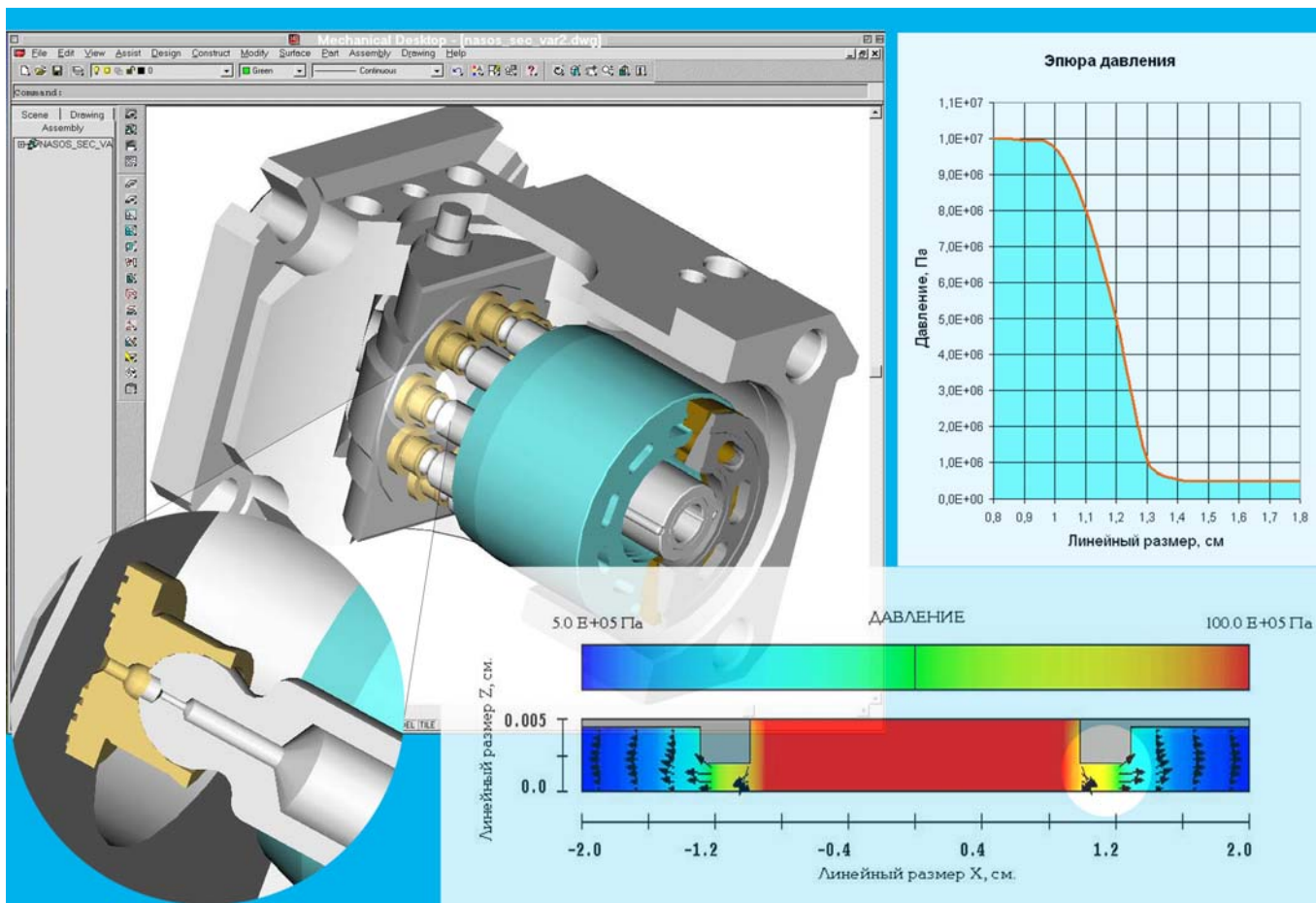


Рис. 12. Применение FLOW-3D в моделировании динамики гидромашин.

Аналогичные задачи решаются для других пар трения: распределитель-блок цилиндров и поршень-блок цилиндров, что и позволяет рассчитывать требуемые характеристики гидромашин, например, характеристику ИД (рис. 13).

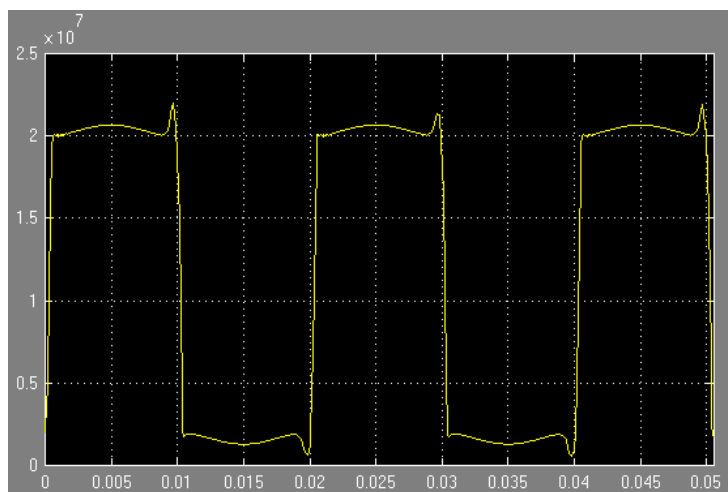


Рис. 13. Индикаторная диаграмма аксиально-поршневого насоса, развернутая во времени.

Заключение.

На предприятиях ОАО «СКБ ПА» и ОАО «КЭМЗ» (г. Ковров) разработана технология расчета машиностроительной гидравлики основанная на использовании комплекса программ для выполнения динамических исследований, прочностных расчетов, конструирования и анализа гидродинамических процессов. В основу комплекса положено использования программного продукта FLOW-3D, который позволяет натурное экспериментирование заменить модельной «проливкой» гидроустройств.

В процессе разработки расчетного комплекса машиностроительной гидравлики, FLOW-3D сориентирован на расчет гидродинамических эффектов, имеющих место при высоких давлениях

(10-60 МПа), широком диапазоне температур при содержании газа в жидкости и различной ее вязкости.

Использование комплекса позволило реализовать системный подход в проектировании машиностроительной гидравлики, проводить весь спектр необходимых технических расчетов, выполнять научные исследования.

Спектр решаемых задач средствами программы FLOW-3D не ограничивается гидростатическим приводом. На предприятиях имеется опыт использования этой программы для расчета газодинамических эффектов, ветровых нагрузок и жидкостной измерительной техники.

Результатом внедрения комплекса на предприятиях ОАО «СКБ ПА» и ОАО «КЭМЗ» является значительное сокращение сроков проектирования гидромашин, устройств гидроавтоматики и в целом гидроприводов, удешевление процесса проектирования, повышение качества разработок.