

Комплекс моделирования гидромашин и систем

ОАО "СКБ ПА", г.Ковров
к.т.н., доцент Я.А. Даршт,
вед. инженер А.В. Пузанов,
вед. инженер И.Н. Холкин

Компания ОАО "СКБ ПА" создана в 1995 году.

На протяжении 8 лет компания успешно занимается разработкой гидро- и электроприводов для объектов различного назначения:

- системы управления машин лесозаготовительного комплекса;
- системы управления объектами в металлургической отрасли;
- многоцелевые электрогидравлические системы управления для дорожной и строительной техники;
- системы управления для нефтяной и газовой промышленности;
- системы управления для робототехнических мобильных комплексов;
- информационно-управляющие системы;
- гидрообъемные передачи.

Гидравлические машины и гидроприводы широко используются в современных комбинированных системах управления различными объектами. Современные гидравлические приводы обеспечивают получение больших усилий и мощностей при ограниченных размерах силовых установок и исполнительных двигателей, высокое быстродействие, плавное регулирование скорости.

Широкое распространение в настоящее время получили объемные гидравлические приводы с применением объемных гидравлических машин. Часто данные приводы применяются в системах управления специальными мобильными машинами, дорожно-строительными машинами, роботами-манипуляторами различного назначения, авиационных системах управления и т.д. Количество внедрений и применений объемных гидроприводов все время увеличивается.

В качестве объемных гидромашин в приводах большой мощности применяют аксиально-поршневые насосы и гидромоторы, имеющие в достаточно широком диапазоне регулирования приемлемый КПД.

Вопросы повышения КПД и надежности гидравлических машин становятся особенно актуальными при форсировании гидромашин по давлению и по скорости.

Существуют различные пути решения данного круга проблем. Это и оптимизация конструкции гидравлических машин, применение правильных режимов регулирования, применение материалов и покрытий с минимальным коэффициентом трения, усовершенствование конструкции трибологических пар, направленное на оптимизацию их геометрических параметров.

Одним из основных направлений развития аксиально-поршневых и аксиально-плунжерных гидромашин, форсированных по давлению и скорости вращения, является повышение долговечности и надежности пар трения: опорный диск - гидростатическая опора; плунжер (поршень) - стенки втулки блока цилиндров; блок цилиндров - распределитель. Вопросам изучения рабочего процесса гидромашин с учетом функционирования приведенных пар трения посвящено большое количество научных работ. Авторы рассматривают математические модели, подходы и методики, имеющие различную степень приближения к действительному рабочему процессу. Однако опыт применения различных известных методик показал, что добиться быстрых и эффективных практических результатов возможно лишь при комплексном подходе к модельным исследованиям. Одним из путей их достижения является применение в процессе проектирования современных программных средств.

В ОАО "СКБ ПА" с самого начала своего существования был взят курс на автоматизацию и информатизацию процесса проектирования. Были приобретены рабочие места инженеров - конструкторов: AutoCAD 12, CADMech. В настоящее время с целью перенесения экспериментальных исследований на имитационное моделирование виртуальных аналогов создан и продолжает развиваться мощный информационный комплекс проектирования изделий машиностроительной гидравлики, включающий расчетный модуль, проектный модуль, модуль подготовки производства. В состав комплекса входят: средства разработки 3D моделей Inventor 5.3 rus, Mechanical Desktop 6, CADMech Desktop; средства разработки 2D чертежей AutoCAD 2002 rus, CADMech; средства технологической подготовки производства TechCard, EdgeCAM; средство анализа гидромеханических процессов Flow-3D; средство кинематического и напряженно-деформированного анализа visualNASTRAN 4D; программы для динамического анализа; программные средства собственной разработки.

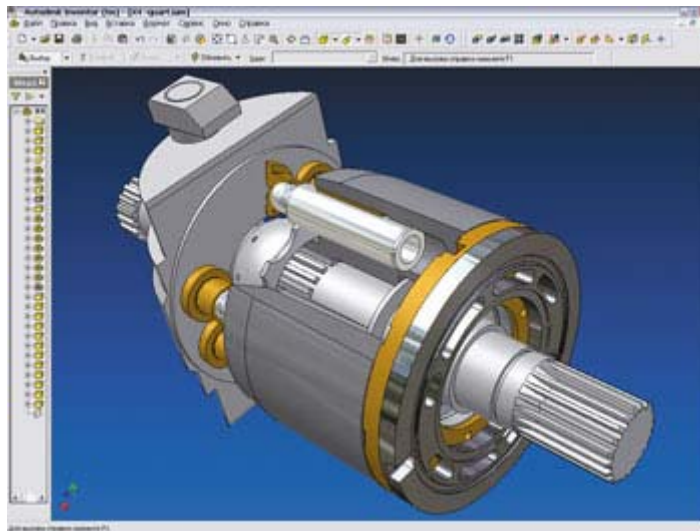


Рис. 1
3D модель ходовой части аксиально-поршневой гидромашины,
выполненная в Inventor 5.3

В целях продвижения на предприятии современных технологий проектирования был разработан программный комплекс, состоящий из нескольких взаимосвязанных частей, каждая из которых реализована посредством специализированного программного обеспечения.

Расчетный комплекс можно определить как информационную компьютерную среду, организованную в соответствии с собственной концепцией и состоящую из коммерческих компьютерных 3-D программ, моделей, выполненных с использованием этих программ, оригинальных однокоординатных имитационных моделей и методик. Комплекс предназначен как для выполнения проектирования машиностроительной гидравлики, так и в целом для модельного сопровождения этапов жизненного цикла изделия.

С учетом данного определения общие положения концепции расчетного комплекса формулируются следующим образом:

- 1) При разработке расчетного комплекса предприятие, проектирующее машиностроительную гидравлику, рассматривается как информационная система, а расчетный комплекс как элемент информационной среды этой системы, построенной на базе современной компьютерной технологии.
- 2) Расчетный комплекс разрабатывается в частности в русле технологий, суть которых в создании и существовании параллельно с выпускаемой продукцией ее виртуального аналога в виде комплекса компьютерных взаимосвязанных моделей.
- 3) Структура расчетного комплекса формируется по общим правилам формирования компьютерной информационной среды и включает взаимосвязанные элементы:
 - комплекс коммерческих программ,
 - комплекс моделей,
 - комплекс расчетных методик.Комплекс моделей и комплекс расчетных методик аккумулируется в библиотеку.
- 4) Конкретный состав расчетного комплекса определяется кругом конкретных задач, решаемых средствами этого комплекса.

Если обобщить тематику рассмотренных выше работ, то можно сделать вывод о содержании расчетного комплекса машиностроительной гидравлики:

- Составляющей такого комплекса являются 3D-программы для анализа статики, кинематики и динамики гидравлических механизмов.
- Другой составляющей такого комплекса должна быть методика энергетического анализа - гидравлические машины, передачи, приводы являются энергосиловыми установками.
- Прочностной анализ, анализ напряженно-деформированного состояния являются также обязательными составными частями проектирования машиностроительной гидравлики, и соответствующие программы входят в расчетный комплекс. Это связано с тем, что гидромашины - это высоконагруженные устройства.

- Рабочим телом гидропривода является жидкость. Ее свойства определяют и конструктивные формы привода, и его характеристики. Поэтому в круг расчетных методик входят методики гидравлики и гидромеханики.
- Гидропривод является сложной динамической системой. Поэтому построение обобщенной имитационной модели требует включения в комплекс универсальной моделирующей программы.

Для объединения органичным образом различных методов и методик машиностроительной гидравлики в единый расчетный комплекс при разумной автоматизации процесса расчета предлагается следующая структура расчетного комплекса:

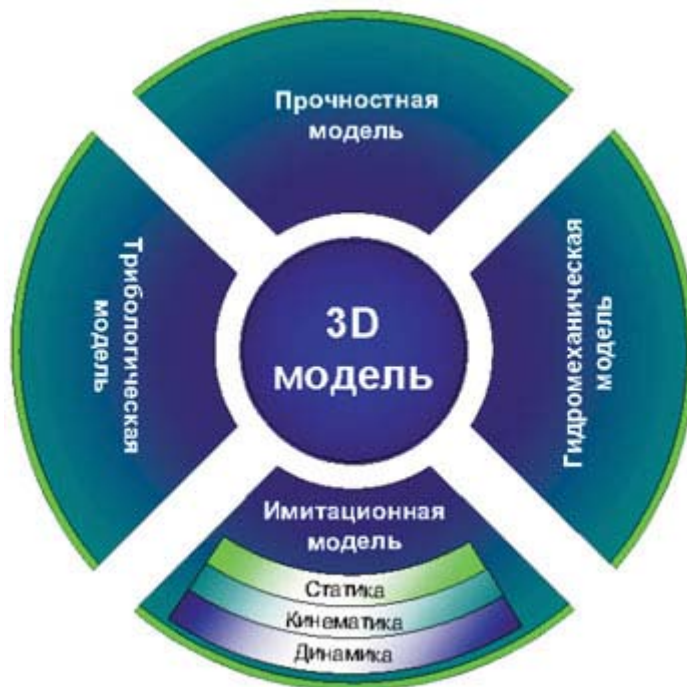


Рис. 2
Структура расчетного комплекса

Рассмотрим использование модельного комплекса для проектирования гидромашин, который состоит из следующих моделей: прочностной, трибологической, гидро-механической и имитационной.

Кинематическая модель

По 3D модели, разработанной инженером-конструктором (например, в Inventor) в visualNASTRAN 4D создается модель кинематических взаимодействий. На Рис. 3 представлена одна из кинематических характеристик - зависимость опрокидывающего момента на гидростатической опоре насоса как функция от времени при изменении сигнала управления на регулирующем органе.

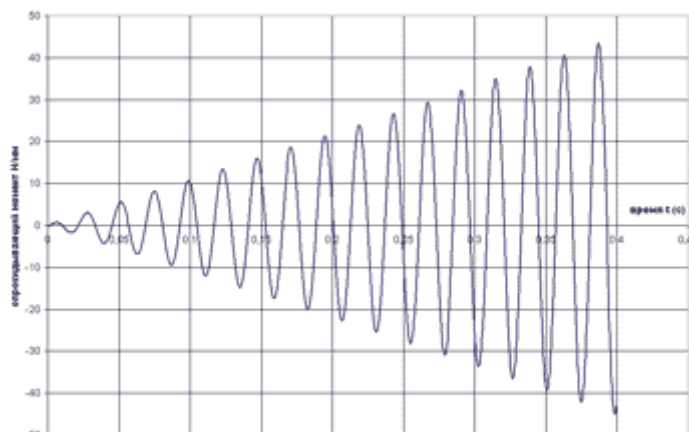


Рис. 3
Зависимость опрокидывающего момента гидростатической опоры от сигнала управления на регулирующем органе

Результаты модели используются имитационной, трибологической и прочностной моделями.

На Рис. 4 представлен пример связанного кинематического и прочностного моделирования ходовой части героторного насоса, используемого в качестве вспомогательного элемента приведенного выше (Рис. 1) аксиально-плунжерного гидронасоса.

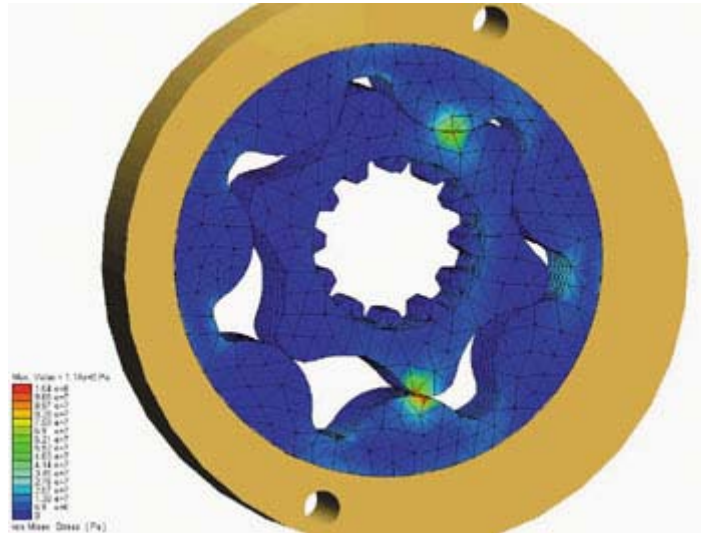


Рис. 4
Модель героторного насоса

Прочностная модель

Известно, что в процессе работы детали и узлы, составляющие модуль ходовой части гидромашины, подвергаются высоким удельным нагрузкам. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили сделать вывод о значимом негативном факторе деформирования исходной геометрии в процессе работы и влиянии деформации на рабочие процессы в гидромашине.

В качестве исходных данных для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей и узлов используется 3D модель; усилия и схема воздействия определяются в обобщенной имитационной модели.

Результаты моделирования востребованы как в виде картины распределения НДС по характерным сечениям изделия проектировщиком, так и в качестве исходных данных имитационной, гидромеханической, трибологической моделями.

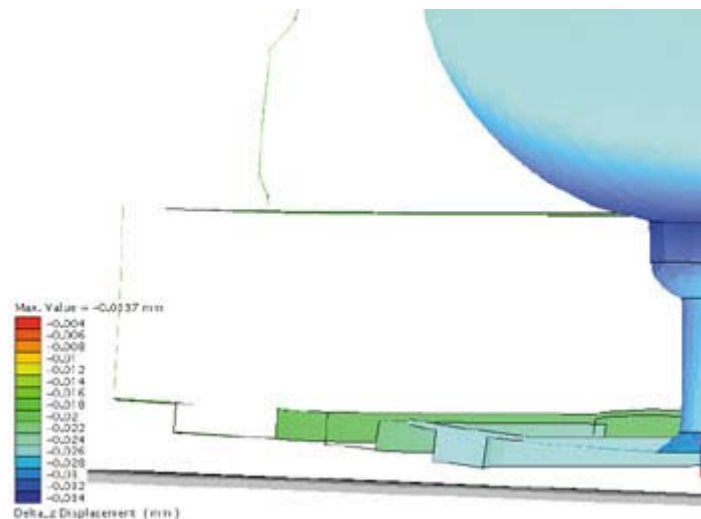


Рис. 5
Деформация гидростатической опоры.

Рост рабочего давления приводит к увеличению деформации прецизионных сопряженных поверхностей. Деформация дна гидростатической опоры (см. Рис. 5) приводит к нарушению функциональности узла, смене режима трения и падению моментной характеристики гидромашины. Кроме того, переход с жидкостного на сухой режим трения приводит к увеличению износа контактируемых поверхностей и резкому снижению ресурса узла.

Трибологическая модель

Рабочий процесс гидромашины предполагает наличие контактных взаимодействий. К негативным факторам следует отнести смену контактных взаимодействий с жидкостного (вязкого) трения на сухое при увеличении деформаций, а также влияние момента страгивания и залипания.

Кроме вышеперечисленных факторов исследовалось влияние технологичности производства изделий на рабочие характеристики гидромашины. Улучшение технологичности подразумевает увеличение допусков (зазоров) и шероховатости, что отражается на себестоимости изделия, однако ухудшает НДС и трибопараметры составляющих узлов, что в свою очередь негативно отражается на рабочих характеристиках гидромашины.

В качестве исходных данных используются 3D модель, результаты прочностной, имитационной и гидромеханической моделей. Результаты моделирования используются при проведении прочностного, гидромеханического и имитационного моделирования. На Рис. 6 приведена картина контактного взаимодействия гидростатической опоры.



Рис. 6

Картина контактного взаимодействия гидростатической опоры

На Рис. 7 изображен график, отражающий влияние шероховатости на контактные напряжения.

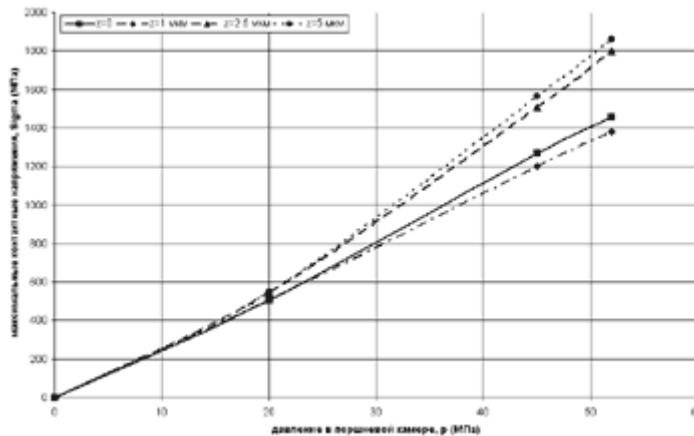


Рис. 7

График зависимости контактных напряжений от параметра шероховатости

Гидромеханическая модель

В качестве инструмента для математического моделирования процесса течения рабочей жидкости (синтетического масла) через зазоры гидростатической опоры применялась специализированная программа Flow-3d (Flow Science, Inc., США). Математическая модель, основанная на гипотезе сплошности среды, состоит из уравнения неразрывности, уравнений движения жидкости в трехкоординатном пространстве и уравнения энергии. Применение специализированной программы для CFD-моделирования позволило получить эпюры давления жидкости в зазоре гидростатической опоры при различных значениях рабочего давления насоса, температуре рабочей жидкости, скорости вращения приводного вала, шероховатостях рабочих поверхностей. Картина течения жидкости в 10-микронном зазоре при постоянном угле деформации пояска гидростатической опоры показана на рис. 8.

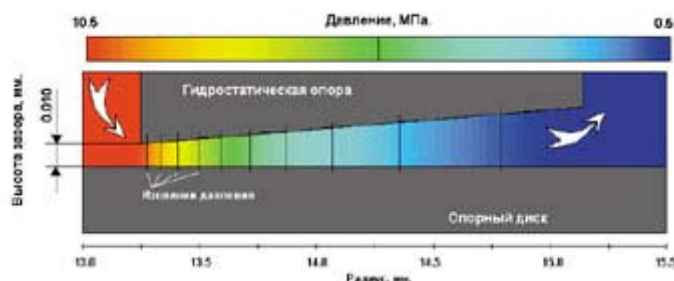


Рис. 8
Картина течения жидкости в зазоре башмака

На Рис. 9 показана зависимость давления в зазоре башмака от угла деформации рабочей поверхности, т.е. от рабочего давления насоса.

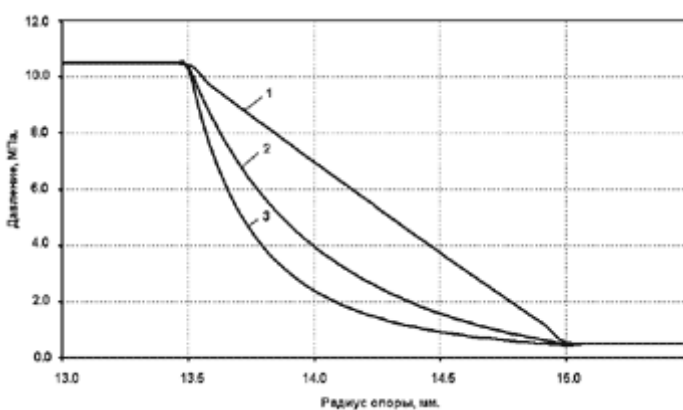


Рис. 9
Зависимость давления от угла деформации $h=10$ мкм

В результате модельных исследований установлен ряд фактов, например, что с появлением даже незначительной деформации рабочей поверхности эпюра давления существенно меняет свою форму в сторону уменьшения своей площади, а значит и отжимающей силы. Так на Рис. 9: 1- эпюра давления при отсутствии деформации поверхности пояска; 2 - эпюра давления при деформации 0.25 градуса; 3 - эпюра давления при деформации 0.5 градуса.

На основе результатов математического моделирования вырабатываются предложения по изменению конструкции гидростатической опоры с целью улучшения рабочих характеристик насоса и решения задачи повышения его ресурса.

Имитационная модель

В связи с тем, что однокоординатная имитационная модель является универсальным, простым, оперативным, гибким средством проектирования, в комплексе расчетных моделей она занимает особое место по отношению к специальным 3D-моделям для гидродинамических, прочностных и других расчетов.

Имитационное моделирование позволяет решить задачи управления, регулирования, статики, кинематики, динамики и энергетики гидравлических механизмов с единых методических позиций и представляет собой объединяющее "ядро" расчетного комплекса.

Совокупность имитационных моделей составляет библиотеку. Разработка этой библиотеки - наиболее сложный и трудоемкий процесс в создании комплекса. Модели библиотеки разрабатываются параллельно с разработкой устройств, являются эксклюзивными, отражающими опыт работы проектной организации, и выполняются на научном уровне по результатам исследований.

Все имитационные модели в библиотеке представлены в двух видах: экспериментальные и теоретические. Экспериментальные модели построены на обобщении результатов модельных экспериментов в программах 3D-моделирования и используются как подмодели более крупных структур. Они обычно простые и быстродействующие. Теоретические модели подробно описывают "физику" процессов. Такие модели универсальны и используются для модельных экспериментов как на уровне отдельных устройств, так и в крупных структурах.

Библиотека имитационных моделей делится на библиотеку моделей гидроустройств и библиотеку моделей гидромашин. К группе гидроустройств относятся все гидроаппараты, вспомогательные элементы, гидроарматура и т.п., то есть все устройства, на которых энергия преимущественно рассеивается; к гидромашинам относятся гидронасосы, моторы, цилиндры, аккумуляторы и другие гидромеханические преобразователи.

Для систематизации имитационных моделей внутри группы гидромашин разработаны дополнительные критерии систематизации; то же предусмотрено и для гидроустройств. Модели гидроприводов и систем формируются на основе моделей гидроустройств и гидромашин и составляют дополнительный раздел библиотеки.

Комплекс специальных расчетных методик строится уже на базе имитационных моделей комплекса. Назначение этих методик состоит в обработке и в обобщении результатов натурных и модельных экспериментов, а также результатов, полученных с помощью 3D-моделей и при выполнении нетиповых расчетов.

Имитационное моделирование основано на зарекомендовавших себя принципах:

- а) принцип графического набора модели в блочно-структурной форме;
- б) принцип набора структуры с использованием последовательного вложения одной структуры в другую;
- в) модульный принцип формирования моделей: модели устройств набираются из элементарных подмоделей, как из модулей;
- г) принцип электро-гидро-механической аналогии;
- д) энергетический принцип и некоторые др.

Пример имитационной модели приведен на Рис. 10. Пример расчета одной из характеристик насоса - индикаторной диаграммы - приведен на Рис. 11. Здесь, в частности, приведена модель аксиально-поршневой насоса. Модель насоса представляет собой объединенную определенным графом совокупность моделей рабочих процессов в его девяти поршневых камерах. Связь параметров рабочих процессов устанавливается на основе модельных исследований в программах комплекса, оперирующих 3D-моделями.

Таким образом, в имитационной модели исследуется совокупная картина процесса.

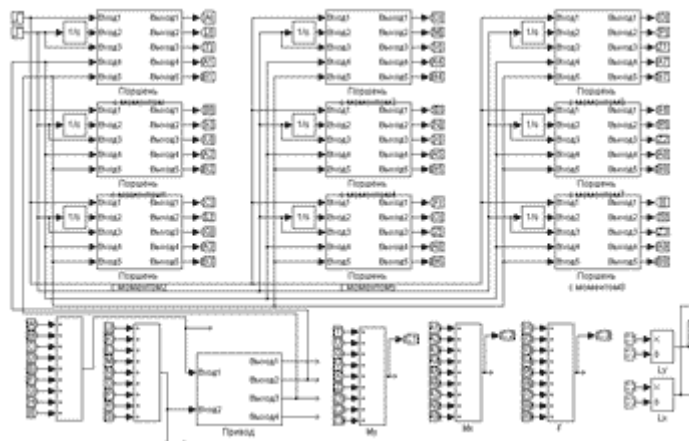


Рис. 10

Модель работы ходовой части аксиально-плунжерной гидромашины

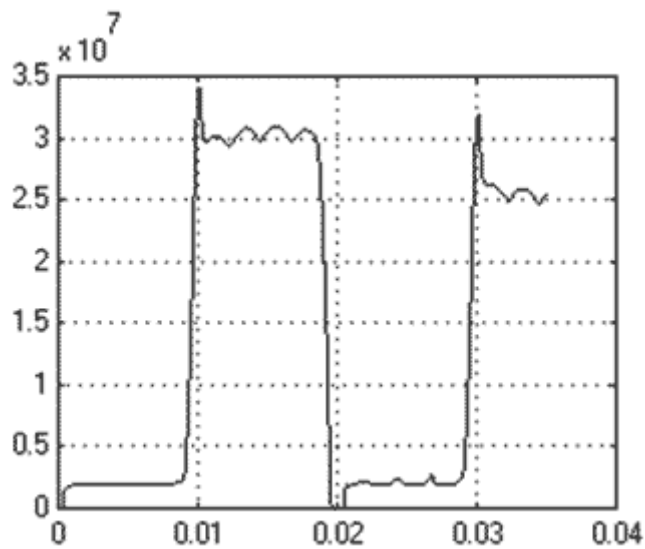


Рис. 11
Индикаторная диаграмма

Заключение

Предлагаемый комплекс предназначен для решения в рамках единой концепции и на системной основе следующих задач машиностроительной гидравлики:

- а) выполнения всех основных типов расчетов;
- б) разработки новых методик расчетов по мере потребности;
- в) выполнения нестандартных, нетиповых расчетов.

Использование комплекса, как показала практика, обеспечивает:
 оперативное выполнение основных типов расчетов устройств и систем машиностроительной гидравлики,
 повышение качества расчетных методик, их научной обоснованности, корректности и точности расчетов,
 аккумулярование опыта расчетов и проектирования, его обобщения,
 обобщение опубликованных результатов исследований других проектных организаций с целью последующего использования в собственной практике,
 удешевление процесса проектирования,
 замену большинства натуральных экспериментов на модельные,
 использование для сопровождения всего жизненного цикла изделия.

Материальные затраты на приобретение специализированных программ математического моделирования и выполнение необходимых расчетов, как показывает опыт эксплуатации компанией ОАО "СКБ ПА" (г. Ковров), окупаются благодаря значительному сокращению экспериментальных работ и их переносу на модельные исследования.