

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 65.011.56

А.В. Пузанов

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ САЕ-МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОРАБОТКИ
ПЛУНЖЕРА ФОРСИРОВАННОЙ ГИДРОМАШИНЫ**

Отработка на технологичность с обеспечением требований функциональности изделия определяет анализ большого количества конструктивных исполнений. Предлагается методика формирования САЕ-моделей из САД-модели с учетом ее упрощения (исключения нефункциональных элементов, применения симметрии и т. п.), добавления недостающих данных (в том числе использования свойств материалов, отличных от САД-модели), возможности мультидисциплинарного анализа в одном или нескольких программных комплексах. Приводится пример конструкторско-технологической проработки плунжера форсированной гидромашин.

Введение

Гидропривод (ГП) – важный компонент современных следящих, силовых и прочих систем управления и стабилизации. Он представляет собой совокупность различных устройств, предназначенных для приведения в движение механизмов и машин посредством рабочей жидкости, находящейся под давлением, с одновременным выполнением функций регулирования и реверсирования скорости движения выходного звена гидродвигателя.

Одной из актуальных задач гидроприводростроения является увеличение мощности гидромашин и гидроаппаратов путем их форсирования (потенциально – по давлению или кинематически – по расходу). При этом улучшаются технические (в первую очередь массогабаритные) характеристики гидропривода, что позволяет расширять его использование в мобильной технике. Решение естественным образом возникающих в процессе разработки и производства ГП вопросов требует более глубокого теоретического анализа рабочих процессов самого привода и его элементов – гидромашин и гидроаппаратов – с конечной целью определения направлений и возможностей разработок и производства, а сокращение времени выпуска продукции – еще и проработки технологичности ее изготовления.

1. Описание отраслевой проблематики и направлений ее решения

В настоящее время наибольшее распространение получило направление теоретического исследования процессов и конструкций гидроприводов и их элементов посредством использования мультифизического (также известного как мульти- или многодисциплинарного) программного обеспечения (МД ПО, или MD CAE в зарубежной терминологии).

Средства инженерного анализа (САЕ-системы) позволяют еще на этапе проектирования до начала производства провести всесторонний виртуальный анализ функциональных и технических характеристик изделия, выполнить имитационное моделирование технологических процессов, оптимизируя технологические параметры для уменьшения брака и экономии ресурсов. Именно расширение использования САЕ-систем в процессах проектирования и технологической подготовки производства способствует повышению качества изделий и снижению издержек производства. Однако, как показали исследования, проведенные компанией Tech-Clarity inc. [1], предварительная подготовка модели конструктора для расчета является самым продолжительным этапом процесса, занимающим до 38 % общего времени моделирования.

Таким образом, при использовании САЕ-систем в условиях конкретного предприятия возникает ряд проблем методологического характера:

1. Как правильно проектировать конструкторскую 3D-модель, чтобы ее можно было эффективно с минимальными доработками использовать во всей линейке необходимых САЕ-систем, применяя МД-анализ, а также выполняя рекомендации технологов?

2. Какие упрощения допустимы в 3D-модели для различных видов анализа, чтобы, с одной стороны, не снизить достоверность результатов, а с другой – уменьшить требуемые вычислительные ресурсы?

3. Какие нужны исследования и эксперименты для создания актуальных баз данных по используемым материалам и производственным условиям? Какова применимость баз данных материалов с различными свойствами для разнотипных исследований?

4. Как подготовить эффективные расчетно-аналитические модели для отдельных видов анализа и для комплексного анализа изделия с учетом применяемых технологий его изготовления? (Проблема комплексного анализа либо декомпозиция моделей и сборка их результатов.)

Поэтому вопросы, рассматриваемые в настоящей статье, являются важными как с научной, так и с практической точки зрения.

При реализации указанных целей САЕ-анализ используется в качестве средства сравнения эффективности конструкторских решений применительно к условиям производства.

2. Комплексный анализ сборочных единиц

Первым вариантом решения обозначенной выше задачи является полный комплексный анализ, т. е. импорт геометрии из САД-программы в САЕ-модуль «как есть», без какой-либо доработки. Обычно подобный способ применяется на финальных этапах конструкторской проработки изделия как сборочной единицы, поскольку продолжительность формирования модели и ее расчет занимают много времени, а также в случаях, когда размерность задачи невелика, а аппаратные ресурсы достаточны либо когда декомпозиция задачи невозможна без нарушения физики процесса.

Некоторые методы решения упомянутых выше проблем изложены в работах [2–4].

В рассматриваемом случае на примере аксиально-поршневой гидромашины моделируем ее основной узел – модуль ходовой части. Исходными данными для расчета являются: контактные взаимодействия конструктивных элементов между собой, их механические свойства, внешние гидромеханические (рис. 1) и температурные нагрузки.

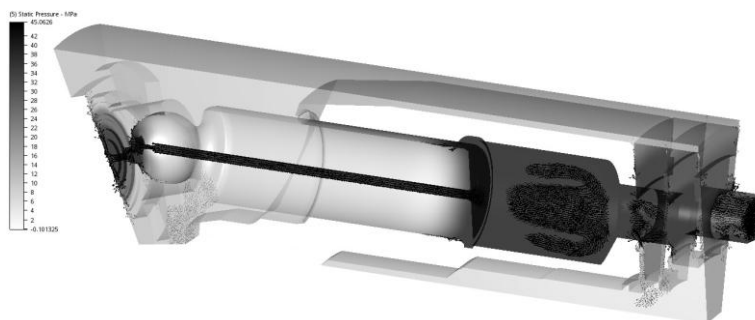


Рис. 1. Поле распределения давления рабочей жидкости и вектора скоростей

На рис. 1 показано используемое в качестве исходных данных для САЕ-анализа поле распределения давления с векторами скоростей поршневой камеры в точке кинематической нейтрали в момент наибольшего значения рабочего давления в зоне нагнетания (для наглядности все твердые тела скрыты). Это результат CFD-анализа на основе той же геометрии гидромашины с учетом установившегося теплового режима работы и диссипации энергии в рабочих зазорах (используется зависимость свойств жидкости от температуры).

В результате САЕ-анализа получаем картину распределения напряженно-деформированного состояния конструкции (рис. 2).

Подобный подход к анализу модели позволяет проанализировать состояние отдельной детали механизма как результат взаимодействия сопряженных деталей при воздействии внешних факторов.

Недостатками данного подхода являются:

- большое количество времени на подготовку модели, ее отладку и обработку результатов;
- длительное время решения;
- высокие требования к аппаратным средствам.

Даже в приведенном выше примере подготовки модели к анализу возникает необходимость в исключении из расчета вспомогательных элементов, не оказывающих влияния на физику процессов, но увеличивающих своим наличием размерность модели. На практике это осуществляется посредством «подавления» таких элементов непосредственно в САЕ-программе, что, однако, не высвобождает существенно компьютерные ресурсы.

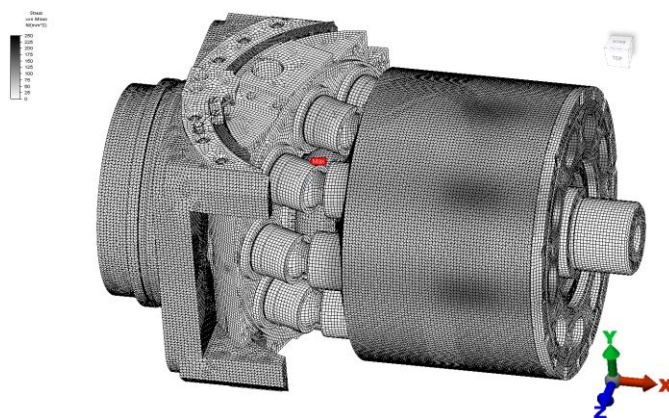


Рис. 2. Напряжения в конструкции модуля ходовой части

Автором предлагается вариант решения описанной выше проблемы посредством методики формирования и анализа моделей в комплексе программ, состоящем из программного средства проектирования 3D-моделей Autodesk Inventor и средств САЕ-анализа Autodesk Simulation CFD и Autodesk Simulation Mechanical [5, 6].

Геометрическая модель гидромашины проектируется в конструкторском подразделении (Autodesk Inventor) и представляет собой параметрическую 3D-модель гидромашины, выполненную из типовых конструкторско-технологических элементов, предварительно согласованных с технологическими службами блоков, обеспечивающих предварительную технологичность изготовления конструктивных примитивов детали [7]. Затем модель передается для моделирования в расчетное подразделение, которое выдает результаты для анализа эффективности предлагаемого решения конструктору или ведущему специалисту изделия.

Принцип формирования САЕ-модели декомпозированной конструкции при отработке ее на соответствие техническому заданию и технологичности рассмотрим на примере плунжера аксиально-поршневой гидромашины.

3. Пример реализации методики формирования САЕ-моделей

Для анализа прочности плунжера необходимо задать силовые воздействия и конструктивные ограничения. Задание ограничений посредством контакта с сопряженными деталями позволяет более подробно с точки зрения кинематики механизма описать рабочий процесс. Кроме того, адекватность модели увеличивается при учете технологических параметров деталей: зазоров в соединениях и отклонений от идеальной формы.

Очевидно, что с точки зрения анализа модель симметрична. Не нарушая функциональности, для расчета можем использовать половину модели (рис. 3), что снизит время анализа и требования к вычислительным ресурсам. Кроме того, в инструментарии постпроцессинга САЕ-программ есть опция «Зеркало результатов модели» (Mirror model Result), которая отражает по указанным плоскостям результаты, отображая исходную геометрию. Возникает организационное противоречие: вносить изменения в конструктивный облик изделия расчетчик не имеет права. При копировании САЕ-модели конструктора в САЕ-модель расчетчика разрыва-

ется связь с исходной геометрией и в случае ее изменения при конструктивной проработке необходимо заново копировать модель и переопределять параметры расчета. Это повышает трудоемкость работ по моделированию до 26 % [1].

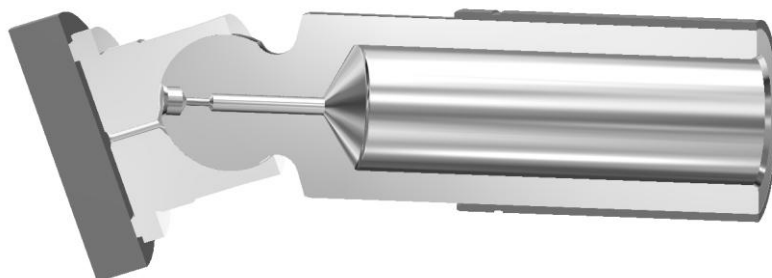


Рис. 3. Подготовленная для расчета модель плунжера с граничными условиями сопряженных деталей

Для исключения разрыва в информационном потоке и обеспечения гарантии аутентичности САЕ-модели (модели конструктора) автором предлагается создание новой сборки и импортирование в нее деталей, разработанных и редактируемых конструктором. На этом же этапе происходит регистрация проекта (расчета) в PDM-системе с присвоением ему типа (PP01, PP04, PP17 и т. п.). Используя в дальнейшем инструменты PDM и PLM, можно не только хранить модели и результаты, но и фиксировать хронологию достижения этих результатов, формировать на ее основе инженерные методики. Вся дальнейшая доработка модели под нужды расчетчика производится только над сборкой, не затрагивая исходную геометрию. Таким образом, при конструкторско-технологической отработке изделия геометрическая модель конструктора автоматически обновляется в сборке для расчета. Это обеспечивает актуализацию расчетной модели и ее результатов. При дальнейшей процедуре импорта и обновления модели в программе анализа прочности дополнительных манипуляций расчетной моделью, как правило, не требуется. Исключением является ситуация с принципиальными решениями: внесением или удалением конструктивных элементов. При этом расчетную модель необходимо проинспектировать, особенно в измененных местах.

В работе в модель для САЕ-анализа в качестве граничных условий добавлена втулка блока цилиндров, гидростатическая опора плунжера и опорный диск (рис. 3). Все детали, кроме опорного диска, импортированы и адаптивно связаны с моделями конструктора. Опорный диск в целях упрощения расчетной модели был заменен на плоский диск с унаследованными свойствами материала.

Поскольку отклонение органа регулирования и, следовательно, перпендикулярной к нему оси гидростатической опоры плунжера расположены под углом к оси плунжера, упрощением для расчета является плоскосимметричная модель относительно плоскости, образованной этими осями.

К параметрам, подлежащим настройке в базовой (шаблонной) расчетной модели, относятся силовые и температурные нагрузки, размеры конечных элементов (КЭ), сгущения и разрежения КЭ сети, контактные пары и их свойства, свойства материалов.

Как правило, свойства материалов, используемых при проектировании изделия в САД-программе, ограничены необходимостью геометрического формообразования, взаиморасположения деталей друг относительно друга и определения их центра масс. Для расчета прочности, частотного отклика, тепло- и массообмена и т. д. необходимы дополнительные параметры материала, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент линейного расширения и т. п. Таким образом, в расчетной модели недостающие компоненты свойств материалов либо заполняются вручную, либо используется аналог материала САД-программы из базы данных САЕ-программы, но с полным набором необходимых значений (также применяются импортные аналоги материалов). При обновлении (повторной трансляции) геометрии детали необходимо определить выбор процедуры фиксации или переопределения свойств материалов, заданных в САЕ-программе. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния конструкции плунжера показаны на рис. 4.

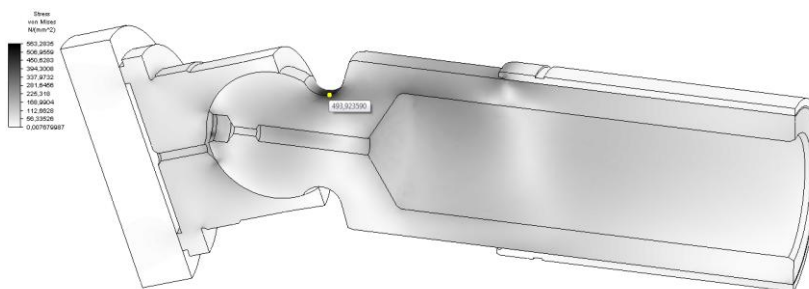


Рис. 4. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния плунжера. Поле напряжений

В практике разработки новых изделий крайне редко деталь, спроектированная конструктором, с первой попытки отвечает всем требованиям технического задания на изделие и технологическим условиям производства. Поэтому процесс конструкторско-технологической проработки изделия обычно носит многоитерационный характер. Продолжительность и количество циклов зависят от квалификации сотрудников и их опыта, величины и точности целевых показателей. При этом окончательное конструктивное исполнение детали претерпевает кардинальные изменения относительно базового варианта. В рассматриваемом случае конструкция полового поршня не отвечает требованиям к весу детали. Кроме того, наличие внутриворшневого пространства оказывает негативное влияние на динамику колебательного процесса рабочей жидкости в процессе функционирования гидромашин. Решением последней проблемы является отсечение внутренней полости плунжера перемычкой. Снижение веса осуществляется путем формирования внутреннего цилиндрического пустотелого объема. Уменьшение объема рабочей жидкости в поршневой камере блока цилиндров делает более жесткой характеристику динамики гидромашин и в меньшей степени зависит от количества растворенного газа в рабочей жидкости. При этом, естественно, возникают новые проблемы технологического плана, решать которые приходится также на этапе конструкторской проработки изделия, в том числе используя средства CAE.

Таким образом, в первоначальной конструкторской модели произошли серьезные изменения: вместо одной детали стало две или три (в зависимости от возможностей технологий механической обработки и сварки), причем даже материалы этих деталей могут различаться. Информацию об изменении в модели и необходимости нового расчета (а также о готовности результатов расчета) обеспечивает PDM-система предприятия.

Для сокращения времени на доработку ранее созданной геометрии САЕ-модели в распоряжении инженера-расчетчика имеется инструмент Inventor «Компонент / Заменить». В рассматриваемом случае необходима замена одной детали сборкой. Если обновленная деталь (или сборка) окажется нерассеченной плоскостью симметрии, то к дополнительным действиям по настройке модели следует добавить перенос заголовка детали (или сборки) в соответствующую ветвь дерева построения модели (рис. 5).

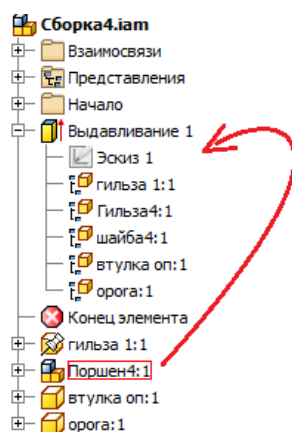


Рис. 5. Добавление элемента, обрабатываемого в сборке

В результате должна отобразиться модель, аналогичная представленной на рис. 3, но с новой геометрией плунжера (рис. 6).

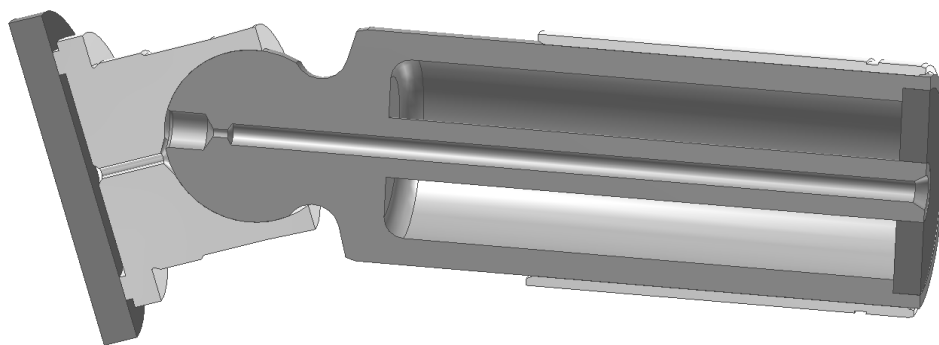


Рис. 6. Обновленная конструкция плунжера в модели для расчета

В дальнейшем процедура препроцессинга упрощается в связи с наличием шаблона (ранее проработанной САЕ-модели). После выполнения процедуры обновления САЕ-модели (команда Inventor Simulation / Launch Active Model) в Simulation Mechanical отобразится модель, в которой будут отсутствовать параметры, необходимые для расчета. Отсутствующие данные связаны с новыми деталями (их материал, тип и размер КЭ, нагрузки и ограничения, включая свойства контакта) и изменениями в конструкции прежних деталей (новые поверхности пазов, отверстий, фасок и т. п.). Все изменения, связанные с изменением вида КЭ, его размера по умолчанию, а также тип контакта для новых деталей можно настроить в свойствах программы или применительно к конкретной модели. Закрепления и нагрузки для новых поверхностей или объемов (деталей) необходимо определить по описанной выше технологии.

После донастройки модели выполняется расчет напряженно-деформированного состояния конструкции плунжера в обычном порядке (рис. 7).

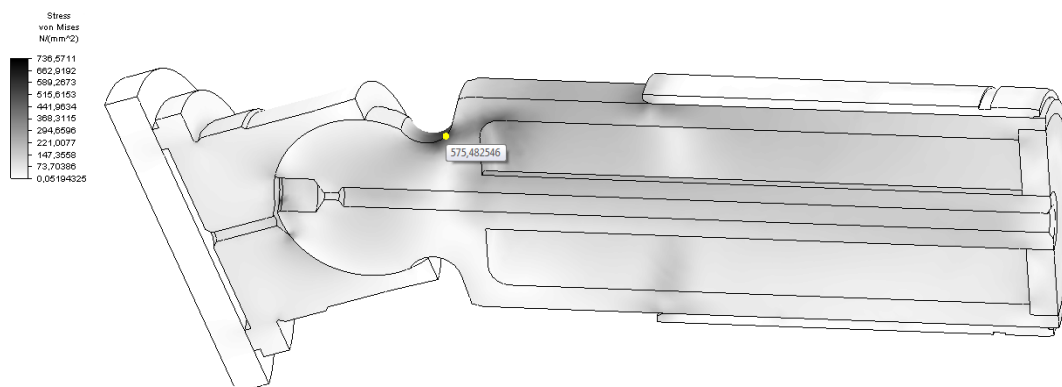


Рис. 7. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния плунжера. Поле напряжений

Примечание. Стоит отметить, что есть возможность изменения геометрии модели непосредственно в Autodesk Simulation Mechanical. Для этого используется таблица Inventor Parameters, заимствующая из Inventor дерево построения модели и ее параметры (сам Inventor может отсутствовать на данной рабочей станции), но в таком случае возникает разрыв взаимосвязи САЕ-модели с моделью САД, что идеологически неправильно.

Как показано выше, небольшие по объему и времени доработки модели необходимы в случае изменения состава изделия или количества поверхностей. Для конструкторско-технологической проработки утвержденного геометрического облика изделия – изменения зна-

чений длины, диаметра, фаски, радиуса и т. п., работа может быть автоматизирована простым макросом [8]. При усложнении подобного макроса условиями и критериями изменения параметров и целевыми параметрами напряжений или деформации получаем локальную оптимизацию конструкции, а используя конструкторско-технологические блоки [7], – оптимизацию с учетом технологичности.

Стоит отметить, что существует альтернативный подход – минимизация размерности задачи посредством преобразования объемных конечных элементов плоскими (оболочечными). В основном этот метод широко применяется в авиационной и космической промышленности для моделирования тонко- и толстостенных конструкций, аппроксимация которых 3D-элементами требует колоссальных вычислительных ресурсов. Подход не нов, однако при простой аппроксимации объемных конструкций оболочечными элементами (например, по средней линии) возникают разрывы в местах торцевых стыков, сопрягать которые приходится вручную или в полуавтоматическом режиме (задав допуск и контролируя сопряжения). Характерным примером автоматизации данного типа формирования CAE-моделей является MSC Apex [9]. MSC Apex «запоминает» расположение и направления сопряжений, восстанавливая и переопределяя их при изменении базовых размеров CAD-деталей.

Заключение

Для сокращения времени конструкторско-технологической подготовки производства гидроприводов, в частности, при отработке на технологичность с обеспечением требований функциональности изделия необходимо моделирование большого количества конструктивных исполнений. В статье предложен один из вариантов решения этой задачи – методика формирования CAE-моделей на примере конструкторско-технологической проработки плунжера форсированной гидромашины с использованием идеологии цифрового прототипа Autodesk и технологии адаптивных моделей Inventor и Simulation Mechanical.

Методика формирования CAE-моделей учитывает возможности мультидисциплинарного анализа в одном или нескольких программных комплексах с учетом упрощения модели (исключения нефункциональных элементов, применения симметрии и т. п.), а также использования свойств материалов, отличных от материалов, предназначенных для CAD-модели.

Для применения принципа декомпозиции модели предложен критерий «время ожидания результатов».

Список литературы

1. Boucher, M. Узкие места в процессе анализа методом конечных элементов / M. Boucher // CAD/CAM/CAE observer. – 2016. – № 6(106). – С. 50–61.
2. Шафранский, С.В. Декомпозиция и многокритериальный выбор в проектировании систем : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.16 / С.В. Шафранский ; Черновиц. гос. ун-т им. Ю. Федьковича. – Черновцы, 1991. – 12 с.
3. Левин, Г.М. Параметрическая декомпозиция в задачах оптимизации проектных решений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.12 / Г.М. Левин. – Минск, 1996. – 38 с.
4. Копысов, С.П. Методы декомпозиции и параллельные распределенные технологии для адаптивных версий метода конечных элементов : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.18 / С.П. Копысов ; Ин-т мат. моделирования РАН. – М., 2006. – 39 с.
5. Пузанов, А.В. Инженерный анализ в Autodesk Simulation Multiphysics / А.В. Пузанов. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 912 с.
6. Пузанов, А.В. Autodesk Simulation Mechanical. Базовый учебный курс : учеб.-метод. пособие / А.В. Пузанов. – М. : Академия САПР и ГИС, 2014. – 75 с.
7. Пузанов, А.В. Принцип постпроизводственного проектирования гидроприводов / А.В. Пузанов // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 3. – С. 36–41.

8. Система автоматизированной оптимизации структурно-параметрических моделей на основе интеграции среды проектирования Autodesk Inventor и языка программирования Python / О.В. Кретинин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 9, ч. 2. – С. 257–260.

9. MSC.Арех [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mssoftware.ru/products/арех>. – Дата доступа : 15.11.2016.

Поступила 13.03.2017

*Специальное конструкторское бюро
приборостроения и автоматики,
г. Ковров, ул. Крупской, 55
e-mail: avp@oao-skbpa.ru*

A.V. Puzanov

**THE METHOD OF FORMING CAE MODELS ON THE EXAMPLE
OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL ELABORATION
OF THE PLUNGER OF FORCED HYDROMACHINE**

Testing on the manufacturability with ensuring the functionality requirements of the product determines the analysis of a large number of designs. The paper proposed a method of forming CAE models from CAD models, taking into account simplification models (with the exception of non-functional elements, the use of symmetry, etc.), add the missing data (including the use of the properties of materials differ from the CAD model), the possibility of a multidisciplinary analysis in one or more software systems. An example of design and technological elaboration of the plunger of forced hydraulic machine is shown.