

УДК 621.454.2

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАПАНА ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЖРД

© 2016 Л.С. Шаблий¹, Д.В. Малов¹, Д.С. Братчинин²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королёва

²ПАО «Кузнецов»

Статья поступила в редакцию 29.10.2016

В статье приведено описание подходов к моделированию клапанов пневмогидравлической системы жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) методом вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) на примере моделирования дифференциального клапана, применяемого в магистралях подвода компонентов жидкостного ракетного двигателя закрытой схемы. Подробно описаны принципиальная, конструктивная схемы и алгоритм функционирования такого клапана, описаны допущения, сделанные при построении геометрической модели гидравлического тракта клапана, дана расчётная методика для определения его гидравлических характеристик. На основе расчётов определены некоторые гидравлические характеристики клапана. Даны предложения по использованию описанной методики моделирования для исследования статических и динамических характеристик элементов пневмогидравлической системы ЖРД.

Ключевые слова: *CFD-моделирование, жидкостный ракетный двигатель, пневмогидравлическая система, клапан, гидравлическая характеристика*

Гидравлические процессы, происходящие в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД), являются предметом пристального внимания инженеров-исследователей, поскольку они во многом определяют эффективность и надёжность двигателя. Расчётное предсказание характера и параметров потоков в элементах двигателя позволяет выявить возможные ошибки проектирования ещё до воплощения изделия в металле, а также найти пути улучшения существующих двигателей с гораздо меньшими затратами в сравнении с экспериментальным исследованием. Однако использование всё более популярных в последнее время технологий CFD-моделирования гидродинамических процессов ЖРД [1, 2], позволяющих выполнять даже оптимизационные исследования на моделях высокого уровня (фактически, виртуальных прототипах), в отечественной ракетной промышленности по-прежнему не имеет широкого распространения. Поэтому в настоящее время перед молодыми отечественными специалистами стоит задача разработки и освоения технологий CFD-моделирования, которые в условиях современного перевооружения средств вычислений (появление технологий кластерных вычислений, суперкомпьютеров), обеспечит быстрый темп проектирования, изготовления и испытаний агрегатов ЖРД.

Работа камеры ЖРД обеспечивается пневмогидравлической системой (ПГС) двигательной установки. Под ПГС понимается совокупность пневмогидравлических устройств и магистралей,

обеспечивающих хранение топливных компонентов и газов на борту летательных аппаратов, их подачу во время работы двигателя под определенным давлением и с определенным расходом в камере сгорания и газогенераторе двигателя, запуск и остановку двигателя, а также выполнение некоторых других операций, определяемых назначением и спецификой эксплуатации летательного аппарата [3-5]. Моделирование потока в трубопроводах, соединителях и других элементах, форма проточной части которых не изменяется при работе двигателя, обычно не представляет сложности. Одним из основных элементов ПГС являются клапаны.

В статье приведено описание подходов к моделированию клапанов ПГС ЖРД методом вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) на примере моделирования дифференциального клапана. Подобные клапаны используют, например, в главных магистралях подвода компонентов жидкостного ракетного двигателя НК-33 Двигатель НК-33 является двигателем многоразового запуска, т.е. позволяет обеспечить многократный запуск (приемосдаточное испытание и работу в составе ракеты-носителя) без переборки основных узлов и агрегатов [6]. Несмотря на то, что после каждого запуска необходима замена некоторых агрегатов одноразового действия, применение в двигателе НК-33 в главных линиях подачи компонентов дифференциальных клапанов позволило не перебирать двигатель после испытания.

Рассматриваемый дифференциальный клапан имеет прямоточную конструкцию (рис. 1). Корпус 1 состоит из наружной оболочки и центрального тела, установленного на пилонах. В центральном теле установлен шток подвижного

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: mlbp@yandex.ru

Малов Дмитрий Вячеславович, старший лаборант. E-mail: animaggg@yandex.ru

Братчинин Дмитрий Сергеевич, ведущий инженер

клапана 3, прижимаемого пружинами 4 к седлу крышки 2, соединённой с корпусом. Для обеспечения герметичности клапана в закрытом состоянии контакт клапана и крышки

обеспечивается уплотнением 5, которое конструктивно может быть выполнено из резины или, в случае криогенного компонента, из фторопласта.

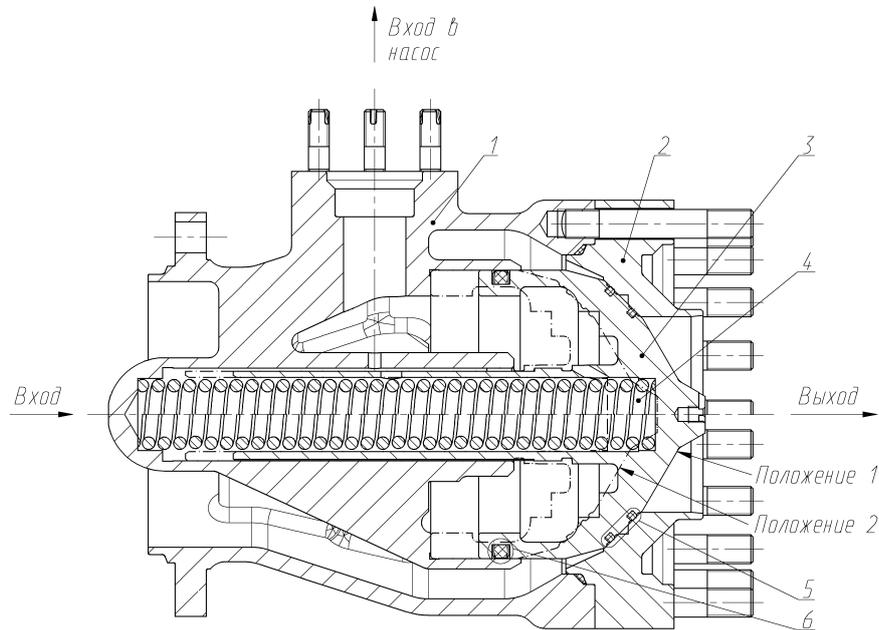


Рис. 1. Продольный разрез дифференциального клапана:
1 – корпус; 2 – крышка, 3 – клапан, 4 – пружина, 5, 6 – уплотнения

Рассматриваемый клапан предназначен для управления моментом подачи топлива в газогенератор или камеру двигателя, а также для прекращения его подачи при выключении двигателя. Перед запуском двигателя клапан закрыт под действием пружины. Топливо по трубопроводам от насоса поступает на вход клапана, заполняя полость *a* до уплотнений.

Также заполняется полость *б*, соединённая через фланец с входом в насос. Пока давление в полостях *a* и *б* одинаковое, клапан остаётся закрытым под действием пружины, и топливо не поступает за клапан к потребителю. После раскрутки пиротурбиной турбонасосного агрегата (ТНА) давление в подводящей магистрали и соединённой с ней полости *a* возрастает. Клапан 3 (см. рис. 1) смещается влево вследствие воздействия давления топлива в зазоре между клапаном 3 и крышкой 2 на коническую поверхность клапана. Вначале при открытии клапана топливо начинает воздействовать на всю поверхность клапана, обеспечивая, таким образом, его полное открытие. При этом со стороны полости *б* давление остаётся равным давлению на входе в насос. Таким образом, клапан остаётся в открытом состоянии до тех пор, пока давление в полости *a* превышает давление в полости *б*, что соответствует работе насоса. Разница давлений, при которой клапан начинает открываться, определяется начальным усилием сжатия пружины и давлением на

входе в насос. Для двигателей закрытой схемы при запуске безопасной последовательностью подачи компонентов является такая, при которой в потребитель сначала поступает окислитель. При заданных давлениях на входе в насосы, определяемых их кавитационными характеристиками, и динамическими характеристиками насосов, момент закрытия клапанов в системе двигателя задается начальным усилием сжатия пружины.

При выходе двигателя на главную ступень тяги повышается частота вращения ротора ТНА, и увеличивающееся давление в подводящей магистрали повышает усилие, прижимающее клапан 4 к корпусу 1. При этом клапан остаётся в открытом положении. Выключение двигателя осуществляется путем прекращения подачи горючего в газогенератор от управляющего элемента. При этом горение в газогенераторе прекращается, падает частота вращения ротора ТНА и давление на выходе из насосов. В результате давление между полостями *a* и *б* выравнивается, под действием пружины 4 клапан 3 (см. рис. 1) возвращается в первоначальное состояние – прижимается к крышке 2, обеспечивая закрытие клапана. При выключении двигателя клапаны закрываются в обратной относительно открытия последовательности: сначала по линии горючего, затем – окислителя. Такая последовательность обеспечивает безопасное выключение двигателя.

Кроме того, для обеспечения минимального импульса последствия в пневмогидравлическую схему двигателя могут быть включены элементы, обеспечивающие ускоренное закрытие клапана по линии подачи горючего.

Приведенный выше принцип работы дифференциального клапана показывает сложность рабочего процесса клапана, обусловленную наличием разности давлений на входе и выходе насоса. В данном исследовании моделировалось течение через полость *a* клапана при разном положении подвижного элемента: от полностью открытого до минимально открытого. Также проводилась оценка сил, действующих по подвижную часть клапана. Течение в полости *b* не моделировалось.

Как и при любом CFD-моделировании процесс расчёта состоял из 5 этапов: геометрическое моделирование, создание сеточной модели, наложение граничных условий, собственно расчёт и анализ полученных результатов. Геометрическая модель проточной части была получена модификацией геометрической модели (рис. 2), созданной авторами [7] в ходе работ по проекту «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)», реализованном в рамках мероприятий блока 2 «Развитие и повышение эффективности научно-инновационной деятельности» и блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры» Программы развития СГАУ на 2009-2018 гг. Она ограничена внутренними поверхностями корпуса клапана, а также подводящего и отводящего трубопровода, поверхностями центрального тела, удерживающих его пилонов, и собственно подвижной части клапана. Геометрия отражает основные поверхности, влияющие на поток. При этом элементы, не оказывающие существенного влияния на поток (соединительные зазоры, малые глухие отверстия под соединительные элементы и т.п.), не были отражены в модели, чтобы не усложнять дальнейшее построение сетки.

Поскольку задачей данного исследования было моделирование потока при различном положении клапана, геометрическая модель была дополнена ещё одним геометрическим телом, моделирующим объём, занятый клапаном проточной части при его промежуточных положениях (показано рис. 3 более тёмным цветом). Таким образом, модифицированная геометрическая модель содержала 2 геометрических элемента: твёрдое тело, представляющее всю проточную часть полностью открытого клапана (см. рис. 2) и второе твёрдое тело, представляющее движущийся элемент клапана. Такое разделение позволило моделировать относительное перемещение двух тел без необходимости перестроения расчётной сетки, так как при моделировании «открытия» клапана не моделировалось

уменьшение полости *b* (см. рис. 1), а смещение происходило беспрепятственным проникновением подвижного тела в неподвижное.

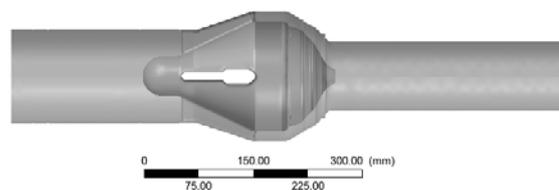


Рис. 2. Геометрическая модель проточной части исследуемого клапана при положении подвижной части клапана, соответствующей полностью открытому состоянию

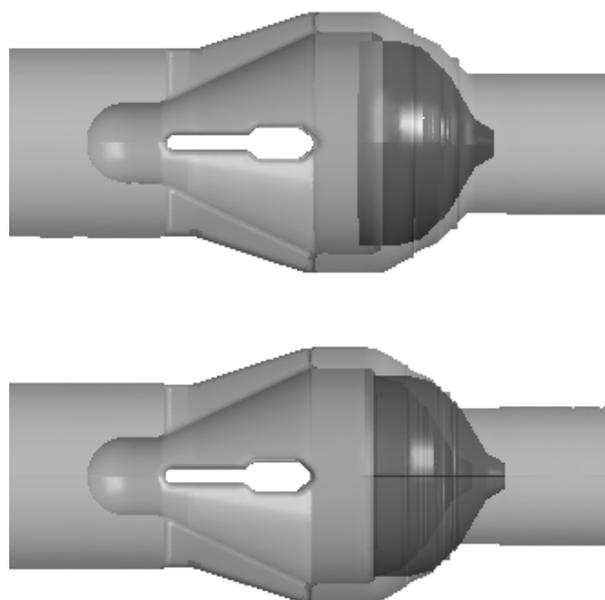


Рис. 3. Положение дополнительного геометрического тела, заполняющего объём подвижной части клапана при её положении, соответствующем полностью закрытому состоянию (внизу) и промежуточному (вверху) режимам клапана

Сеточная модель была создана в программе ANSYS Meshing. Были использованы следующие настройки сеткогенератора:

- ассоциация размерной функции элементов сетки – на кривизну (*Use Advanced Size Function* → *On: Curvature*);
 - предельные размеры элементов: минимальный (*Min Size*) – 0,1 мм, максимальный (*Max Size*) – 23 мм, максимальный размер стороны элемента (*Max Face Size*) – 12 мм.
 - коэффициент соотношения размеров соседних ячеек (*Growth Rate*) – 1,2
 - плавный переход к загущению пристеночного слоя (*Inflation Option* → *Smooth transition*)
- С помощью инструментов *Sizing*, *Method* и *Inflation* были заданы параметры разбиения тел на конечные элементы. Пример такого разбиения представлен на (рис. 2).

Сгенерированная сетка (рис. 4) содержала 2,3 млн. элементов (тетраэдры – пирамиды с треугольным основанием, треугольные призмы и пирамиды с четырёхугольным основанием).

Как уже было упомянуто ранее, моделирование перекрытия подвижной частью клапана проточной части проводилось без перестроения сетки, с использованием модели «твёрдого тела, погруженного в жидкость» (*Immersed Solid*) [8]. При этом используется сетка проточной части, соответствующей полностью открытому клапану (рис. 4), но часть ячеек, маркированная программой как ячейки, занятые твёрдым телом (рис. 5), становятся непроницаемыми для потока. Это хорошо видно по линиям тока на разных режимах (рис. 6). При этом смещение тела *Immersed Solid* задавалось на этапе запуска решения как параметр модели «смещение по локальной оси Z» (см. рис. 5).

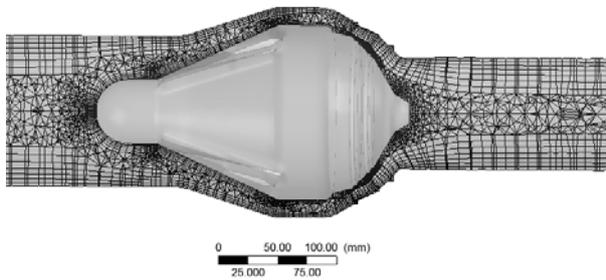


Рис. 4. Визуализация расчётной сетки для модели полностью открытого клапана на плоскости, находящейся под углом 45° к плоскости симметрии пилонов центрального тела

Представленные на рис. 6 картины течения были получены расчётами в стационарной постановке. Полученные из таких расчётов данные могут характеризовать дроссельные свойства клапана (рис. 7). Однако конкретные дроссельные характеристики можно получить только для заранее условий работы клапана, определяемых ПГС: постоянная разница давлений на клапане и изменяемом расходе или наоборот постоянный расход при изменяющемся давлении на одной или двух границах. Приведенные на рис. 6 и 7 результаты были получены при моделировании постоянного расхода.

На втором этапе моделировалось течение через клапан с учётом перемещения его подвижных частей в нестационарной постановке. При этом движения запирающего элемента может задаваться по законам механики твёрдых тел (*Rigid Body* [8]). Решатель ANSYS CFX на основании заданных механических свойств перемещаемого элемента (ориентации, степени свободы, центра масс, массы, моментов инерции, начальной скорости и ускорения и т.д.) учитывает суперпозицию сил инерции, упругости пружины и давления жидкости и вычисляет

перемещение в заданные моменты времени. Визуальным результатом такого моделирования является видео рабочего процесса клапана в заданных условиях, которое может быть использовано для исследования работы на виртуальных прототипах.

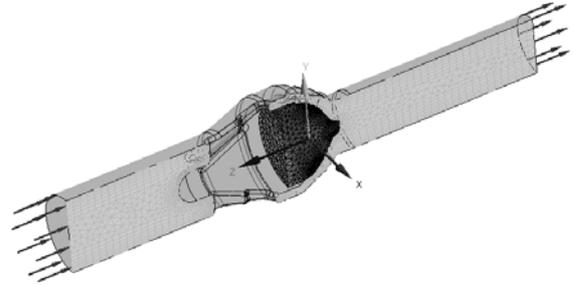


Рис. 5. Визуализация расчётной модели проточной части с добавленным в неё по технологии *Immersed Solid* твёрдым телом, представленным также сеточной моделью

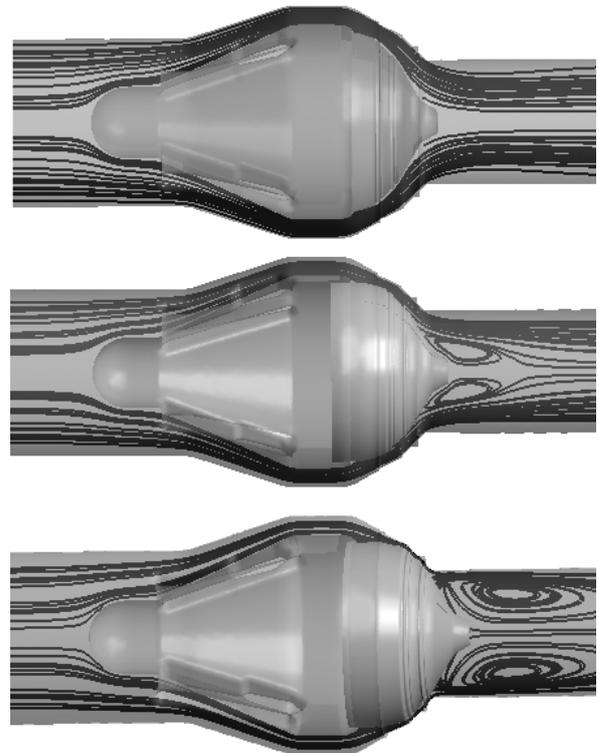


Рис. 6. Линии тока в клапане: полностью открытым (вверху), частично открытым (в середине), практически закрытым со смещением клапана в 3 мм над положением «закрыто» (внизу)

Выводы: описанный набор программных инструментов, моделей и последовательности их применения можно рассматривать как опробованную методику, позволяющую проводить моделирование клапанов, а также других элементов пневмогидравлической системы ЖРД и определение их характеристик в рамках оптимизационных исследований или проектных работ.

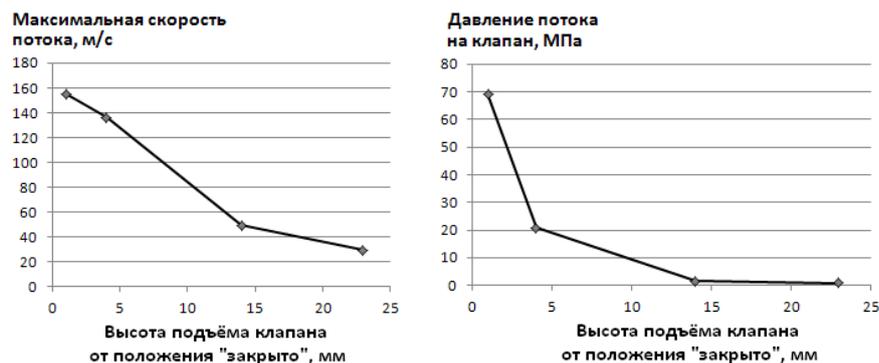


Рис. 7. Характеристики клапана в зависимости от высоты подъёма клапана

Авторы выражают благодарность авторам [7] за высокое качество созданной ими в рамках проекта «Разработка технологии и методического обеспечения для создания виртуального жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)» геометрической модели проточной части клапана, которая была взята за основу для создания модифицированной геометрической модели, использованной в данном исследовании. Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Министерства образования и науки в рамках выполнения Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Сулинов, А.В. CFD-моделирование шнекоцентробежных насосов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX: методические указания / А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий. – Самара: СГАУ, 2013. 57 с.
- Сулинов, А.В. Численное моделирование потоков в водородных шнекоцентробежных насосах турбонасосных агрегатов ЖРД: электронные методические указания (3,6 Мбайт) / А.В. Сулинов, Л.С. Шаблий, В.М. Зубанов. – Самара, 2013. 1 электр. опт. диск (CD ROM).
- Борисов, В.А. Основы конструирования ракетных двигателей: Учебное пособие. – Самара, СГАУ, 2007. 98 с.
- Пичугин Д.Ф. Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев, КуАИ, 1989. 244 с.
- Пичугин, Д.Ф. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. – Куйбышев, КуАИ, 1989. 244 с.
- Борисов, В.А. Жидкостный ракетный двигатель НК-33 [Текст]: методические указания / В.А. Борисов, А.М. Жижкин, В.С. Мелентьев. – Самара: СГАУ, 2011. 27 с.
- Гимадиев, А.Г. Разработка численной модели рабочего процесса основных клапанов компонентов топлива ЖРД: электрон. учеб. пособие / А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Гафуров, Д.С. Братчинин. - Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Электрон. и граф. дан. (83 Мбайт). - Самара, 2013. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
- CFX Modeling Guide. Version 15. ANSYS Inc., 2014.

CFD-SIMULATION OF VALVE FROM PNEUMATICHYDRAULIC SYSTEM OF LPRE

© 2016 L.S. Shabliy¹, D.V. Malov¹, D.S. Bratchinin¹

¹ Samara National Research University named after acad. S.P. Korolyov

² PJS “Kuznetsov”

The description of approaches to simulation of valves of pneumatichydraulic system of the liquid power rocket engine (LPRE) by method of computing hydrodynamics (Computational Fluid Dynamics – CFD) on the example of differential fuel valve of the LPRE with closed fuel scheme is provided in article. Explicitly the principle, design schemes and algorithm of valve functioning are described, the assumptions made at creation of geometrical model of hydraulic path of the valve are described, the calculated technique for definition of its hydraulic characteristics is given. On the basis of calculations some hydraulic characteristics of the valve are defined. Offers on use of the described simulation technique for a research of static and dynamic characteristics of elements of the LPRE pneumatichydraulic system are given.

Key words: CFD-simulation, liquid power rocket engine, pneumatichydraulic system, valve, hydraulic characteristic

Leonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor. E-mail: mlbp@yandex.ru;
Dmitriy Malov, Senior Laboratory Assistant.
E-mail: animaggg@yandex.ru;
Dmitriy Bratchinin, Leading Engineer