

СИСТЕМНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

© 2016 Н. Р. Горюнова, А. А. Горюнов

Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

В статье рассматривается проектирование пневмогидравлической системы подачи (ПГСП) компонентов топлива к жидкостному ракетному двигателю (ЖРД), основанная на математических моделях и системном подходе. Выделено три уровня проектирования: первый уровень – отдельных элементов ПГСП – рассматриваются физические процессы в элементах ПГСП, моделируются их характеристики и внешние взаимосвязи; второй уровень – подсистем – рассматривается процесс взаимодействия между элементами ПГСП, моделируются внутренние связи между элементами и внешние взаимосвязи подсистем ПГСП; третий уровень – ПГСП в целом – рассматривается процесс взаимодействия между подсистемами, моделируются внутренние связи между подсистемами и внешние взаимосвязи с ЖРД и другими системами. В результате получена многоуровневая математическая модель ПГСП, на основе которой проведено моделирование нештатной ситуации (отказа одного элемента) и замены элемента с изменением его характеристик в подсистеме подачи окислителя к двигателю; получена зависимость параметров продувки демпфера от скорости изменения расхода на входе в ЖРД в процессе его запуска. Математическая модель ассоциирована с результирующими документами, что позволяет автоматически получить изменённый комплект документации при внесении изменений в ПГСП.

Вычислительная гидрогазодинамика, двигательная установка, математическая модель, пневмогидравлическая система, системный подход.

Введение

Жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) представляет собой совокупность одного или нескольких жидкостных ракетных двигателей, ёмкостей для размещения топлива, систем и устройств, обеспечивающих запуск, работу двигателей на заданных режимах и их выключение [1]. Одной из важнейших систем ЖРДУ является пневмогидравлическая система подачи (ПГСП) топлива к двигателям. На этапе проектирования ПГСП разрабатываются следующие документы:

- схема пневмогидравлическая принципиальная;
- схема пневмогидравлическая функциональная;
- гидравлические и теплофизические расчёты;

– технические задания на отдельные элементы системы.

В данных документах определяются внутренние и внешние взаимосвязи ПГСП и состояние системы в целом. При этом возникает проблема нарушения ассоциативности между документами из-за отсутствия единой математической модели ПГСП, учитывающей взаимодействие ПГСП с другими системами и взаимодействие элементов внутри ПГСП. Разрабатываемые математические модели для гидравлических и теплофизических расчётов находят ограниченное применение для решения отдельных задач.

Таким образом, проектирование ПГСП, основанное на использовании математических моделей и системном подходе, является актуальной задачей.

Системно-математическое моделирование ПГСП

Основными положениями предлагаемого подхода к проектированию ПГСП являются следующие:

- в результате проектирования ПГСП должна быть получена математическая модель системы, имеющая внешние связи для взаимодействия с другими системами ЖРДУ;

- итоговые проектные документы, такие как схемы и расчёты, должны быть ассоциированы с математической моделью таким образом, чтобы изменения в системе автоматически отражались в документации;

- математическая модель ПГСП должна учитывать все уровни взаимодействия: от взаимодействия отдельных элементов внутри ПГСП до взаимодействия ПГСП с другими системами;

- должна иметься возможность параметрической оптимизации ПГСП.

Предлагается следующий подход к проектированию ПГСП, в котором выделяются три уровня:

- первый уровень – проектирование отдельных элементов ПГСП – рассматриваются физические процессы в элементах, моделируются их характеристики и внешние взаимосвязи;

- второй уровень – проектирование подсистем – рассматривается процесс взаимодействия между элементами ПГСП, моделируются внутренние связи между элементами и внешние взаимосвязи подсистем ПГСП;

- третий уровень – проектирование ПГСП в целом – рассматривается процесс взаимодействия между подсистемами ПГСП, моделируются внутренние связи между подсистемами и внешние взаимосвязи с ЖРД и другими системами.

Выделение уровня подсистем обусловлено тем, что в ПГСП можно выделить функционально обособленные группы элементов (подсистема заправки, подсистема дренажа, подсистема зарядки ресиверов высокого давления и др.). Объ-

единение элементов ПГСП в отдельные подсистемы позволяет упорядочить её структуру, упорядочить взаимосвязи между элементами и, в конечном итоге, создать более гибкую математическую модель системы.

Математическая модель неотделима от средств разработки. Для каждого из предлагаемых уровней проектирования существует достаточно большое количество программных средств, которые позволяют создать математическую модель, но выбор этих средств в рамках создания многоуровневой математической модели существенно ограничен. Дополнительные ограничения также создаёт необходимость получения итоговых проектных документов, выполненных в соответствии со стандартами и ассоциированных с математической моделью.

С учётом имеющихся требований в качестве средства разработки математической модели на первом уровне выбраны модули CFX (моделирование теплофизических и гидравлических процессов) и Mechanical (моделирование напряжённо-деформированного состояния в расчётах гидроударов и подобных переходных процессов) программного комплекса Ansys [2]. Для второго и третьего уровня выбраны средства Matlab (моделирование взаимодействия отдельных элементов и подсистем, гидравлический и теплофизический расчёт на уровне подсистем, моделирование функционирования системы и получение итоговых документов – гидравлического расчёта и схемы пневмогидравлической функциональной) и Creo Schematic (моделирование топологии ПГСП, получение итогового документа – схемы пневмогидравлической принципиальной). Для обмена данными между средствами моделирования и организации ассоциативной связи необходима разработка дополнительных программных модулей.

Примеры практического применения

Рассмотрим пример моделирования нештатной ситуации в подсистеме подачи окислителя к двигателю.

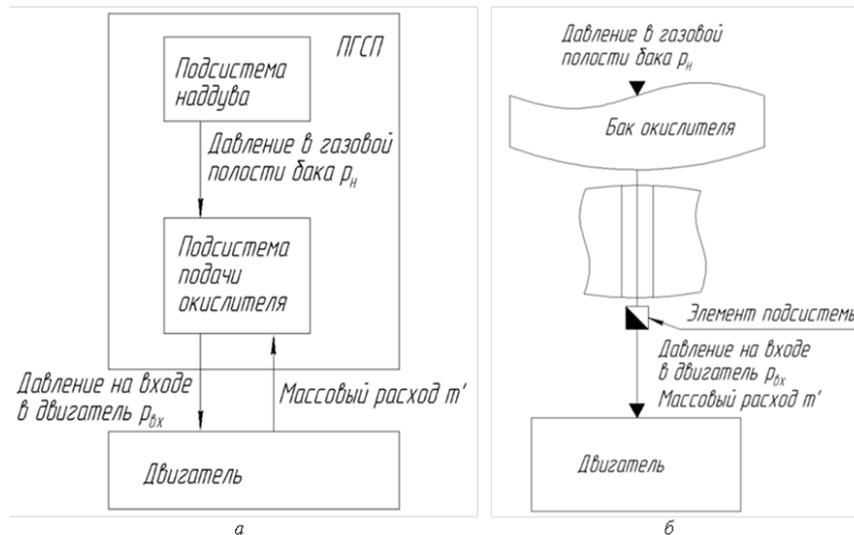


Рис. 1. а – схема взаимодействия подсистем ПГСП и двигателя;
б – схема подсистемы подачи окислителя к двигателю

Подсистема подачи окислителя к двигателю описывается следующей математической моделью.

Внешней характеристикой подсистемы подачи окислителя и ПГСП в целом является давление на входе в ЖРД:

$$p_{\text{вх}} = p_n + p_{\text{ст}} - p_{\text{сн}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{вх}}$ – давление компонента топлива на входе в двигатель, Па; p_n – давление в газовой полости топливного бака, Па; $p_{\text{ст}}$ – давление столба жидкости над входом в двигатель с учётом действующей перегрузки, Па; $p_{\text{сн}}$ – гидравлические потери в магистрали подачи компонента топлива к двигателю, Па.

На уровне ПГСП подсистема подачи окислителя к двигателю связана с подсистемой наддува топливных баков через давление в газовой полости бака p_n , которое является внешней характеристикой подсистемы наддува.

Схема взаимодействия подсистем ПГСП и ЖРД и схема подсистемы подачи окислителя к двигателю приведены на рис. 1.

Гидравлические потери в магистрали подачи компонента топлива к двигателю являются суммой потерь на трение в трубопроводах и потерь на местных сопротивлениях:

$$p_{\text{сн}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}}, \quad (2)$$

где $\Delta p_{\text{тр}}$ – гидравлические потери на трение в трубопроводах, Па; $\Delta p_{\text{м}}$ – гидравлические потери на местных сопротивлениях, Па.

Гидравлические потери на местных сопротивлениях определяются следующим образом:

$$\Delta p_{\text{м}} = \frac{\rho V^2}{2} \sum \zeta_{\text{ми}}, \quad (3)$$

где $\zeta_{\text{ми}}$ – коэффициент местного сопротивления; ρ – плотность компонента топлива, кг/м³; V – средняя по площади сечения магистрали скорость компонента топлива, м/с.

На уровне подсистемы подачи окислителя гидравлические потери на местных сопротивлениях являются внешними характеристиками отдельных элементов подсистемы.

Средняя по площади сечения магистрали скорость компонента топлива определяется выражением

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho F}, \quad (4)$$

где \dot{m} – массовый расход, кг/с; F – площадь сечения магистрали подачи компонента топлива, м².

Жидкостный ракетный двигатель описывается уравнением влияния внешних факторов на характеристики двигателя:

$$\Delta X_j = \sum_i c_i \Delta F_i, \quad (5)$$

где ΔX_j – изменение характеристики двигателя; ΔF_i – изменение внешнего фактора; c_i – коэффициент, определяющий влияние изменения фактора F_i на изменение характеристики X_j .

В соответствии с выражением (5) внешняя характеристика ПГСП – давление на входе в двигатель – оказывает влияние на такие характеристики двигателя, как тяга, удельный импульс и, в частности, расход окислителя через двигатель,

который в свою очередь является внешней характеристикой ЖРД по отношению к ПГСП.

Таким образом, получена взаимосвязанная математическая модель подсистемы подачи окислителя к двигателю как части ПГСП, связанной с подсистемой наддува и ЖРД.

Для обеспечения заданного давления окислителя на входе в двигателя большое значение имеют определённые и стабильные гидравлические характеристики подсистемы подачи окислителя. Таким образом, нештатной ситуацией может быть резкое ухудшение гидравлического сопротивления одного из элементов подсистемы.

В составе подсистемы подачи окислителя рассматривается турбинный преобразователь расхода (ТПР) в виде отдельного элемента, геометрия которого представлена на рис. 2, а. ТПР предназначен для преобразования скорости окислителя в магистрали в электрический сигнал. При моделировании нештатной ситуации рассматривается неисправность ТПР, состоящая в останове вертушки и создании дополнительного сопротивления потоку окислителя.

Моделирование гидравлических характеристик ТПР с застопоренной вертушкой проведено в модуле CFX программного комплекса Ansys (рис. 2, б, в).

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

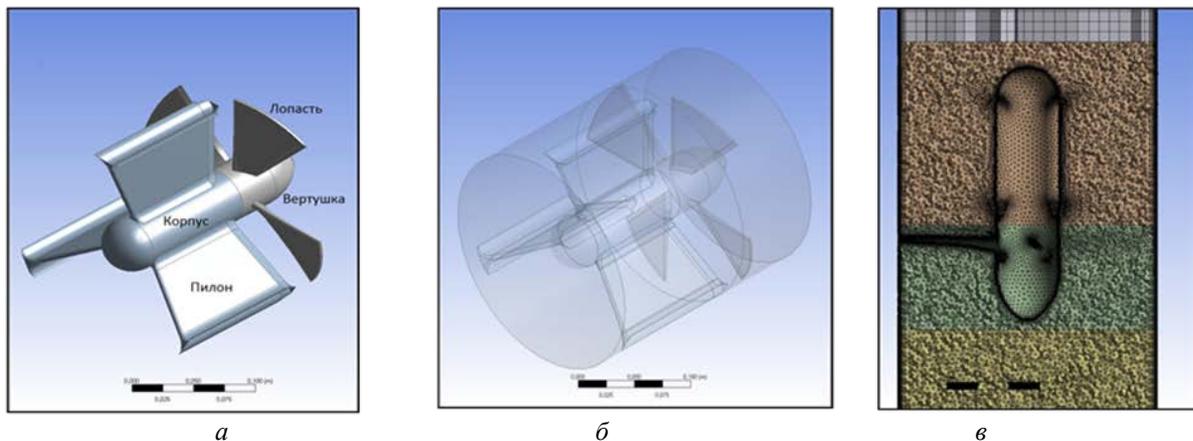


Рис. 2. а – геометрия ТПР; б – расчётная модель ТПР; в – расчётная сетка

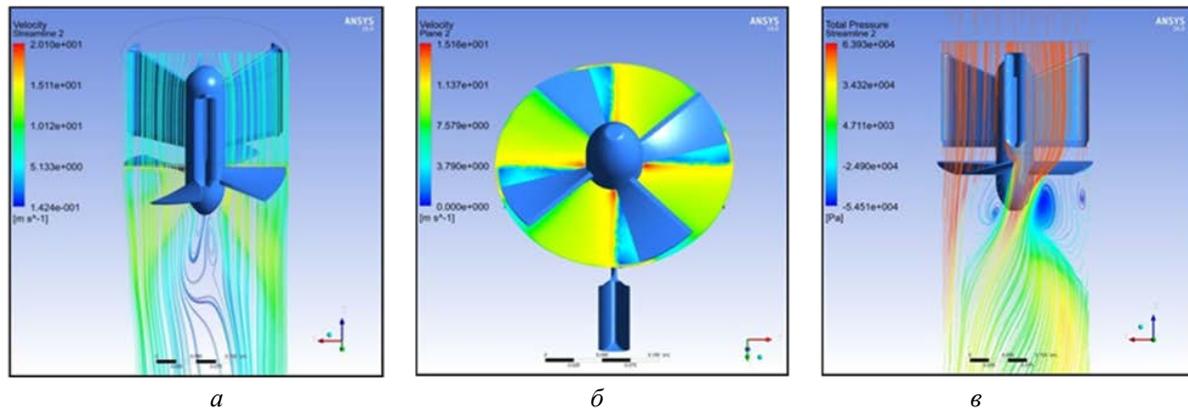


Рис. 3. а – линии тока в плоскости оси датчика;
 б – поле скоростей в сечении, проходящем через лопасти датчика;
 в – полное давление на линиях тока в плоскости, параллельной оси датчика
 и пересекающей лопасть датчика

Можно отметить следующие особенности течения:

- плавное сжатие и ускорение потока между пилонами, корпусом;
- сжатие, ускорение и закручивание потока между лопастями и расширение потока за лопастями;
- срыв потока с кромок лопастей, образование за ними вихрей и обратных токов;
- наибольшее изменение полного и статического давления на лопастях.

В результате расчёта получено, что несмотря на повышение гидравлических потерь на ТПР с остановленной вертушкой на 96 % и повышение суммарного сопротивления магистрали и магистрали подачи окислителя на 23 ... 31 % по сравнению с ТПР с вращающейся вертушкой, снижение давления на входе в двигатели относительно номинального не превышает 2,9 %, а изменение расхода окислителя через двигатель не превышает 0,18 %. Таким образом, влияние повышенного сопротивления ТПР с застопоренной вертушкой на характеристики двигателя является незначительным.

В процессе экспериментальной отработки, а также с целью повышения ха-

рактеристик ПГСП возникает необходимость замены агрегата одного типа на другой. При этом новый агрегат может находиться на стадии проектирования и его фактические характеристики неизвестны и не могут быть подтверждены экспериментально. В этом случае математическое моделирование является единственным возможным способом определения влияния замены агрегата на работу ПГСП.

В рассматриваемую подсистему подачи окислителя входит клапан разделительный окислителя (КРО), предназначенный для разделения (в процессе подготовки к запуску) и объединения (перед запуском) ЖРД и ПГСП по линии подачи окислителя. Общие виды заменяемого клапана и КРО новой конструкции представлены на рис. 4.

Математическая модель подсистемы подачи окислителя соответствует модели, рассмотренной в предыдущем примере.

Моделирование гидравлических характеристик нового КРО проведено в модуле CFX программного комплекса Ansys. Результаты моделирования представлены на рис. 5-7.

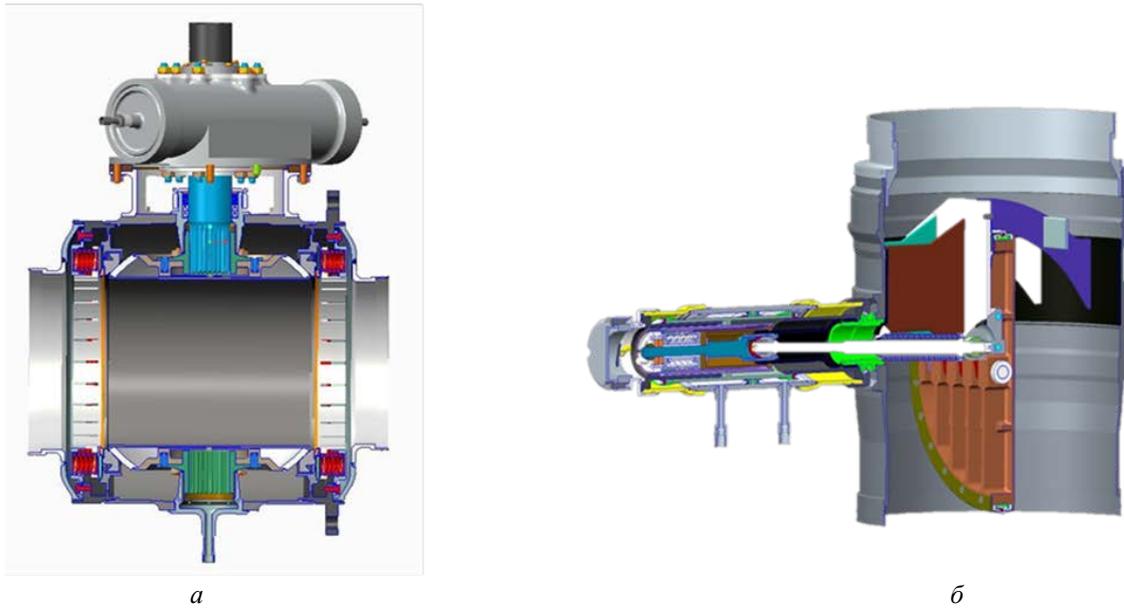


Рис. 4. а – общий вид КРО существующей конструкции; б – общий вид КРО новой конструкции

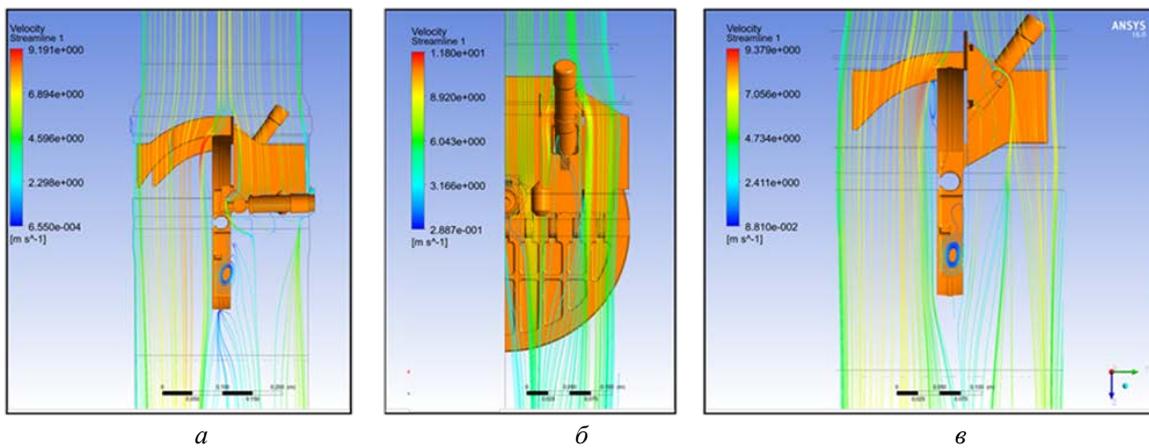


Рис. 5. а – линии тока в плоскости симметрии; б – линии тока в плоскости симметрии; в – срыв потока на заслонке, образование вихрей

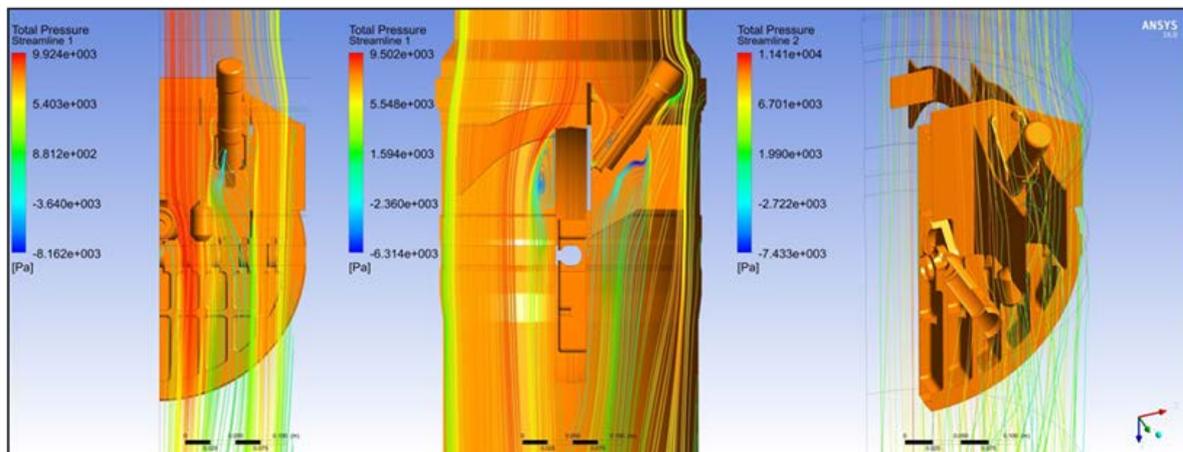


Рис. 6. Линии тока при обтекании конструктивных элементов КРО

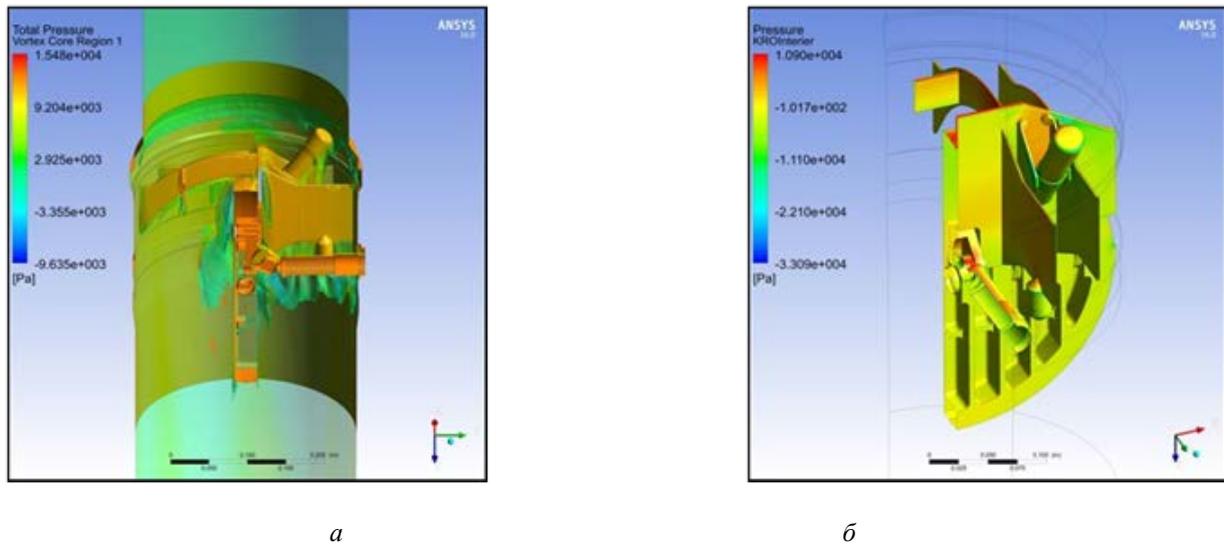


Рис. 7. а – регионы образования вихрей за конструктивными элементами КРО;
б – распределение давления по поверхности конструктивных элементов КРО

Можно отметить следующие особенности течения:

- обтекание заслонки происходит с отрывом потока и образованием вихрей;
- образование вихрей в ячейках заслонки за осью её поворота.

По результатам проведённых расчётов выявлено, что гидравлическое сопротивление КРО новой конструкции составляет 8,4 кПа; коэффициент сопротивления 0,44, что не более чем на 10 % отличается от характеристик заменяемого КРО; гидравлическое сопротивление 7,6 кПа; коэффициент сопротивления 0,4. Повышение суммарного сопротивления магистрали окислителя с новым КРО составляет не более 1 %, снижение давления на входе в двигатель – менее 0,1 %, а изменения расхода окислителя через двигатель не возникает.

Следующим примером является моделирование влияния переходного процесса в ЖРД на работу ПГСП.

Схема взаимодействия подсистем ПГСП и ЖРД, а также схема подсистемы подачи окислителя к двигателю приведены на рис. 8.

При рассмотрении влияния переходного процесса в ЖРД на работу ПГСП к математической модели добавляется зависимость параметров (массового расхода, давления на входе в двигатель, гидравлических потерь) от времени, а также и инерционная составляющая гидравлических потерь (в уравнение (2) добавляется $\Delta p_{ин}$).

На этапе разработки эскизного проекта важно определить взаимное влияние ЖРД и ПГСП. При этом фактические характеристики ЖРД и ПГСП неизвестны и отработка их взаимодействия возможна исключительно на математических моделях.

В подсистему подачи окислителя входит демпфер, предназначенный для снижения частоты основного тона колебаний давления окислителя в магистрали с целью исключения её резонанса с упругим корпусом ракеты-носителя (РН) и обеспечения устойчивости продольного движения РН.

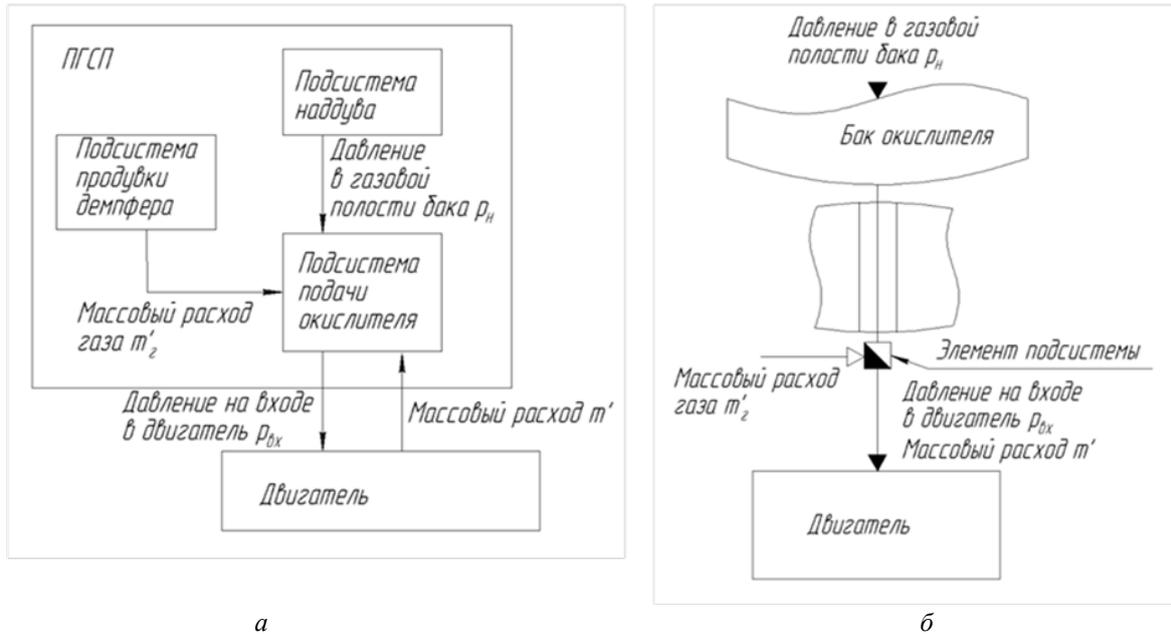


Рис 8. а – схема взаимодействия подсистем ПГСР и ЖРД;
 б – схема подсистемы подачи окислителя к двигателю

Рассматривается демпфер без подвижных элементов, принципиальная схема которого показана на рис. 9. В процессе запуска двигателя массовый расход увеличивается, а давление на входе двигателя падает. При этом жидкость из жидкостной полости демпфера поступает в магистраль окислителя, а уровень жидкости в демпфере снижается. Подача газа в демпфер должна регулироваться таким образом, чтобы уровень жидкости не опускался ниже уровня отверстий и газ не поступал на вход в двигатель. Моделирование переходного процесса в демпфере проведено в модуле CFX программного комплекса Ansys. Результаты моделирования на различных режимах представлены на рис. 10.

В результате моделирования получена зависимость массового расхода газа в демпфер от скорости изменения расхода на входе в ЖРД в процессе его запуска.

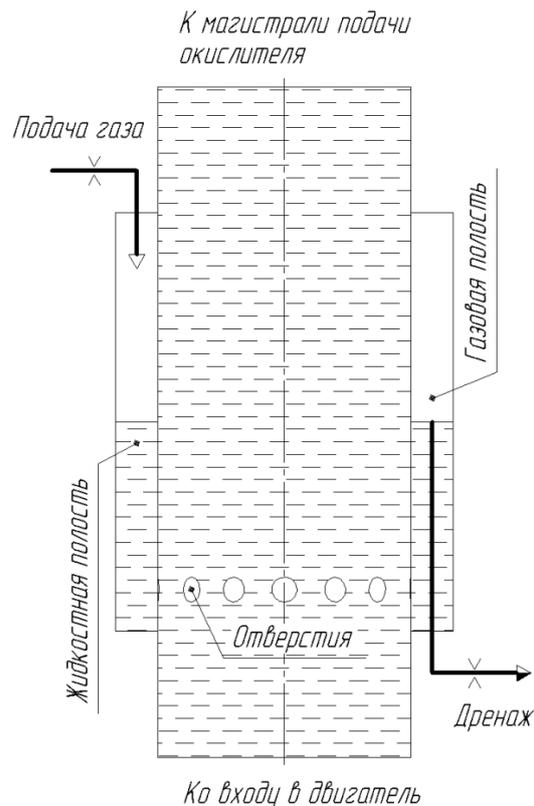


Рис. 9. Принципиальная схема демпфера

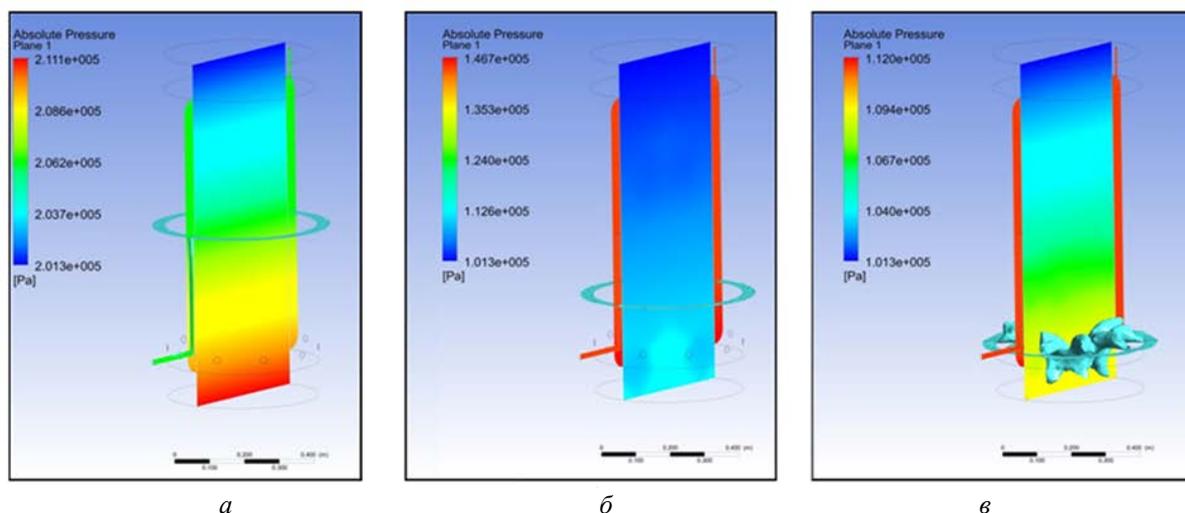


Рис. 10. а – наддув демпфера при постоянном давлении в магистрали;
 б – отклик демпфера на снижение давления в магистрали;
 в – отклик демпфера на снижение давления в магистрали

Заключение

Применение предлагаемого подхода к проектированию на основе многоуровневых математических моделей с применением системного подхода позволило разработать математическую модель части ПГСП, включающую уровни от отдельного элемента до взаимодействия систем. На основе построенной математической модели получены гидравлические характеристики отдельных элементов ПГСП: турбинного преобразователя расхода и клапана разделительного окислителя; определено взаимодействие подсистем подачи окислителя с подсистемами

наддува и продувки демпфера, а также взаимодействие ПГСП и ЖРД; определено влияние изменения гидравлических характеристик отдельных элементов ПГСП на характеристики ЖРД; определено взаимодействие ПГСП и ЖРД при переходных процессах в ЖРД.

Гибкость разработанной математической модели и ассоциативная связь с результирующими документами позволяет решать задачи на всех этапах разработки и эксплуатации изделий и, в случае необходимости, внести изменения в ПГСП и автоматически получить изменённый комплект документации.

Библиографический список

1. Беляев Н.М. Расчёт пневмогидравлических систем ракет. М.: Машиностроение, 1983. 219 с.
2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение, 2004. 510 с.

Информация об авторах

Горюнова Нэлли Рашитовна, инженер-конструктор, Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара. E-mail: th0104@yandex.ru. Область научных интересов: математическое моделирование, пневмогидравлические системы, двигательные установки.

Горюнов Александр Александрович, ведущий инженер-конструктор, Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара. E-mail: al.goryunov@gmail.com. Область научных интересов: гидрогазодинамика, математическое моделирование.

SYSTEM-MATHEMATICAL SIMULATION OF ENGINE AIR HYDRAULIC POWER SUPPLY

© 2016 N. R. Goryunova, A. A. Goryunov

Joint Stock Company «Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation

This article describes the concept of designing a pneumatic-hydraulic system of feeding fuel components to a liquid-propellant rocket engine based on mathematical models and the system approach. There are three levels of designing: the first level is that of designing separate components of the fuel feed system- at this level physical processes in the system's components are considered, their characteristics and external interactions are modeled; the second level is that of subsystems –at this level the process of interaction between the system's elements is considered, internal connections between the elements and external interconnections of the system's subsystems are modeled; the third level is that of the fuel feed system as a whole -at this level the process of interaction between the subsystems is considered, internal connections between the subsystems and external connections with the engine and other systems are modeled. A multilevel mathematical model of the fuel feed system was constructed. On the basis of the model an emergency situation (a faulty element) is modeled and the element is replaced, with its characteristics in the subsystem of feeding the oxidizer to the engine being changed; the dependence of the damper blow-down parameters on the rate of change in the input flow to the engine in the course of its starting is obtained. The mathematical model is associated with resultant documents, which makes it possible to get a modified set of documentation automatically when changes are introduced in the engine fuel feed system.

Computational fluid dynamics, engine, mathematical model, pneumatic-hydraulic system, system approach.

References

1. Belyaev N.M. *Raschet pnevmogidravlicheskih sistem raket* [Design of rocket pneumatic-hydraulic systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 219 p.
2. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. *ANSYS dlya inzhenerov: spravochnoe posobie* [ANSYS for engineers: Reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 510 p.

About the authors

Goryunova Nelly Rashitovna, design engineer, Joint Stock Company «Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: th0104@yandex.ru. Area of Research: mathematical modeling, pneumatic-hydraulic systems, engines.

Goryunov Aleksandr Alexandrovich, design engineer, Joint Stock Company «Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: al.goryunov@gmail.com. Area of Research: fluid dynamics, mathematical modeling.