УДК 629.78 DOI 10.18698/2308-6033-2016-07-1509

Фундаментальные соотношения как основа математической модели объединенной двигательной установки МКС

© Д.В. Сысоев

ОАО «РКК Энергия им. С.П. Королева», г. Королев, Московская обл., 141362, Россия

Объединенная двигательная установка Международной космической станции (ОДУ МКС) состоит из значительного числа элементов. Нарушения работоспособности ОДУ могут быть критичными для жизнеспособности МКС. Для решения задачи моделирования и исследования процессов перераспределения жидкостей и газов между емкостями при работах с ОДУ предложена математическая модель системы. Выполнены числовые расчеты для модельной системы, состоящей из трех баков. В качестве модельной жидкости выбрана вода, в качестве газа вытеснения — молекулярный азот. Задавали начальные давления газа наддува и объемы жидкости во всех баках. Цель расчета — верификация соотношений модели. Результаты расчета показали адекватность и непротиворечивость принятой модели. Направления процессов соответствуют представлениям о закономерностях изменения состояния рассматриваемой системы. Полученные соотношения могут быть использованы при разработке математической модели пневмогидросистем ОДУ, позволяющей прогнозировать и анализировать процессы при работах по управлению ОДУ.

Ключевые слова: *объединенная двигательная установка, пневмогидравлическая система, моделирование перераспределения жидкостей, математическая модель, анализ работы системы.*

Объединенная двигательная установка Международной космической станции (ОДУ МКС) как пневмогидравлическая система представляет собой комплекс, состоящий из большого числа баков, магистралей, компрессоров, арматуры и жидкостных ракетных двигателей, различным образом соединенных между собой. Баки имеют сложную конструкцию с разделением жидкостной и газовой полостей сильфоном. Нарушения работоспособности ОДУ могут быть критичными для жизнеспособности МКС. Даже при невысоких перепадах давлений на элементы конструкции баков действуют значительные силовые нагрузки. Аварии, вызванные неверным прогнозированием направления движения компонентов, могут иметь катастрофические последствия. В связи с чем задача моделирования и исследования процессов перераспределения жидкостей и газов между емкостями при планировании и выполнении полетных операций с системой ОДУ является актуальной. Для решения этой задачи на первом этапе предложена математическая модель системы.

Исходные данные для разработки математической модели можно сформулировать в следующем виде. Имеется система из нескольких баков. В баках содержится рабочее тело — жидкость под давлением, которое создается газом наддува в полости над жидкостью. Газ и жидкость разделены между собой мембраной или сильфоном. В начальный момент времени баки изолированы один от другого по жидкостным магистралям (клапаны закрыты). После соединения жидкостных магистралей (открытия клапанов) вследствие разности давлений в баках начинается процесс перераспределения жидкости между баками. На данном этапе исключают из рассмотрения работу компрессоров, которые также могут изменять давления в газовых полостях. Необходимо создать модель перераспределения (перетекания) жидкости в зависимости от времени.

Рассмотрим нестационарное перетекание жидкости по магистрали из емкости в емкость, вызванное действующим на жидкость давлением вытеснения в условиях невесомости.

Вязкостью жидкости, жесткостью мембран и сильфонов, разделяющих жидкость и газ, а также гидравлическими сопротивлениями в трактах пренебрегаем. Жидкость, таким образом, является идеальной.

Рассмотрим систему, состоящую только из двух баков (рис. 1).

Для получения соотношений, описывающих перетекание жидкости из бака в бак, воспользуемся известным фундаментальным гидродинамическим соотношением — уравнением Бернулли для элементарной струйки идеальной несжимаемой жидкости, которое выражает постоянство полного напора вдоль струйки [1]:

$$p + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = \mathrm{const},$$

или

$$\frac{p}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2g} = H,$$

где p — давление в данной точке жидкости; h — геометрическая высота данной точки элементарной струйки; ρ — плотность жидкости; v — скорость жидкости в данной точке; H — полный напор.

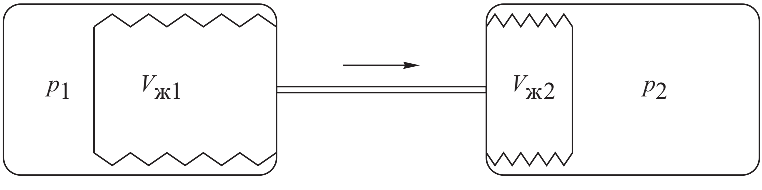

Рис. 1. Система из двух баков:
p_1 и p_2 — давления в баках; $V_{ж1}$ и $V_{ж2}$ — объемы жидкости в баках; стрелкой показано направление течения при $p_1 > p_2$

Рассмотрим два сечения в гидравлической части системы: первое (индекс «1») — на поверхности жидкости в первом баке под мембраной, второе (индекс «2») — в зоне, где поток жидкости втекает во второй бак из магистрали. Применим к элементарной струйке, заключенной между сечениями, уравнение Бернулли.

С учетом условий невесомости, пренебрегая скоростью жидкости в первом сечении, получаем

$$p_1 = p_2 + \frac{\rho v^2}{2}.$$

Отсюда скорость втекающей во второй бак жидкости в каждый момент времени под действием изменяющейся разности давлений

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \qquad (1)$$

Отметим важное для понимания физической сути процесса обстоятельство. Для случая идеальной жидкости скорость течения на выходе из магистрали во второй бак будет сохраняться постоянной по всей длине магистрали с постоянным диаметром вплоть до зоны выхода магистрали из первого бака. Давление в жидкости на выходе из магистрали во второй бак также будет сохраняться постоянным по длине магистрали. При отсутствии трения в жидкости перепада давлений по длине нет.

Зона входа в магистраль из первого бака является местом принципиальной перестройки течения. При этом окончательно направленный поток формируется только в магистрали. В зоне выхода из магистрали во второй бак струя вытекает с определенной скоростью и далее замедляется уже в баке.

Используя соотношение (1), можно получить модель перетекания жидкости из бака в бак под действием перепада давлений с дискретным шагом по времени. Дискретный шаг может быть равен, например, 1 с или иметь любое другое значение, удобное для конкретной физической задачи. Эта математическая модель является дискретным аналогом решения дифференциального уравнения о выравнивании уровней давления или высот в сосудах с жидкостью.

Если пренебречь изменением давления за малый промежуток времени (считать давления постоянными), то в соответствии с уравнением неразрывности за единицу времени во второй бак поступит (а из первого вытечет) жидкость, масса которой $G = \rho v F$, где F — площадь сечения магистрали, присоединенной к баку. Объем жидкости составит $V_ж = vF$. Тогда через 1 с после начала перетекания объем жидкости в первом баке

$$V_1 = V_{10} - vF_2,$$

где V_1, V_{10} — конечный и начальный объемы жидкости для данного шага в первом баке; F_2 — площадь сечения магистрали, подведенной ко второму баку. Соответственно объем жидкости во втором баке $V_2 = V_{20} + vF_2$.

Объемы на шаге $i+1$ связаны с объемами на шаге i следующими соотношениями:

$$V_{1i+1} = V_{i1} - vF_2; \quad (2)$$

$$V_{2i+1} = V_{2i} + vF_2. \quad (3)$$

Скорость втекания также изменяется во времени в зависимости от давлений в первом и втором баках.

Изменение объема жидкости в баках вызовет изменение давления в газовой полости каждого из баков. Давление в каждой газовой полости можно определить из следующего фундаментального соотношения — уравнения Менделеева — Клапейрона [2]:

$$p_g V_g = \frac{m}{\mu} RT, \quad (4)$$

где p_g, V_g, m — давление, объем и масса газа в газовой полости; μ — молекулярная масса газа; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Отсюда для первого и второго баков в момент времени на шаге $i+1$ давление составит соответственно

$$p_{1i+1} = \frac{1}{V_{1gi+1}} \frac{m}{\mu} RT_1 \quad (5)$$

и

$$p_{2i+1} = \frac{1}{V_{2gi+1}} \frac{m}{\mu} RT_2, \quad (6)$$

где объем газа в полостях баков равен разности полного объема бака и объема жидкости в баке: $V_{1gi+1} = V_{1T} - V_{1i+1}$ и $V_{2gi+1} = V_{2T} - V_{2i+1}$.

Значение температуры в соотношениях (5) и (6) зависит от процесса, в соответствии с которым происходит изменение объема и давления в полости. В общем случае это политропический процесс, если температура постоянна, — изотермический.

Расчет по соотношениям предлагаемой модели выполняется в следующей последовательности. На первом шаге расчета, который соответствует начальному моменту времени, известны по результатам приема телеметрической информации или задаются значения всех давлений и всех объемов жидкостей и газов в баках. Затем вычисляется скорость втекания жидкости в бак по соотношению (1). При необходимости уточняется направление перетекания, оно происходит из бака с большим давлением в бак с меньшим давлением. По формулам (2) и (3) определяются объемы жидкости в баках, обусловленные втеканием жидкости за единичный временной интервал.

На следующем этапе с помощью соотношений (5) и (6) находятся новые значения давлений в газовых полостях баков и сравниваются между собой для установления момента прекращения перетекания. В случае, если их разность превышает заданный порог точности, шаг расчета повторяется. При этом для вычисления скорости втекания жидкости во второй бак используются полученные значения давлений в газовых полостях.

Далее рассмотрим систему из нескольких баков. Они могут быть соединены жидкостными магистралями произвольно, но при этом к каждому баку подведена только одна магистраль. Усложнение модели связано с введением дополнительных емкостей — приемников и источников жидкости.

Необходимо определить при аналогичных случаю двух баков исходных данных изменение во времени объемов жидкостей в каждом из баков после их объединения по жидкостным магистралям.

Скорость втекания жидкости в бак с наименьшим давлением определяется максимальным перепадом давлений в системе, т. е. разностью между наибольшим и наименьшим значениями давления и не зависит от наличия баков с давлением ниже максимального.

Для определения же скорости втекания жидкости в баки с давлением, находящимся в диапазоне между наибольшим и наименьшим значениями, необходимо учесть следующее. Скорость втекания определяется перепадом между давлением в данном баке и максимальным давлением в случае, если давление в данном баке минимальное в системе. В противном случае (давление не минимальное), вследствие наличия баков с меньшим давлением, чем в рассматриваемом баке, фактическая скорость втекания будет представлять собой разность скоростей, с которой втекала бы жидкость при перепаде давлений между данным баком и баком с максимальным давлением, и скоростью, с которой вытекала бы жидкость при перепаде давлений между данным баком и баком с минимальным давлением. Физически это не означает существования двух встречных потоков в бак и из бака, а означает уменьшение скорости втекания, которая может поменять знак при преобладании вытекания жидкости. При скорости, равной нулю, бак находится в режиме подпора.

Например, в системе из четырех баков для бака № 3 при максимальном перепаде давлений, создаваемом баком № 1, и минимальном, создаваемом баком № 4, суммарная скорость втекания в него жидкости в соответствии с формулой (1)

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_3)}{\rho}} - \sqrt{\frac{2(p_3 - p_4)}{\rho}}. \tag{7}$$

За единицу времени в каждый из баков j втечет объем жидкости

$$v_j F_j = F_j \left(\sqrt{\frac{2(p_1 - p_j)}{\rho}} - \sqrt{\frac{2(p_j - p_4)}{\rho}} \right). \tag{8}$$

Соответственно изменятся объемы жидкости в каждом баке и давления в полостях над жидкостью.

Расчет объемов и давлений в системе из нескольких баков на очередном шаге выполняется аналогично соотношениям (2), (3) и (5), (6). Для вычисления скорости втекающей в бак жидкости используется соотношение (7), для расчета объема жидкости, поступившей в бак, — соотношение (8). После каждого шага выполняется сравнение значений давления в баках для определения момента, когда значения давления в каких-либо баках становятся равными. Очевидно, что после этого перетекание в системе в целом не прекращается, как в случае для двух баков. Перетекание останавливается при полном выравнивании давления между всеми баками.

По предлагаемым соотношениям выполнены вычисления для модельной расчетной системы, состоящей из трех баков объемом 200 л каждый, соединенных магистралями диаметром 8 мм. Эти параметры близки к конструктивным геометрическим характеристикам ОДУ. Задавали начальные давления газа наддува и объемы жидкости во всех баках. В качестве модельной жидкости выбрана вода, в качестве газа вытеснения — молекулярный азот. Все значения давления и объемов в начальный момент для трех баков различались и составляли $15\cdot10^5$, $10\cdot10^5$ и $2\cdot10^5$ и 160, 90 и 10 л соответственно. Процессы изменения объема газа в газовых полостях полагали изотермическими с температурой T = 293 K. Шаг расчета по времени равен 1 с. Целью расчета являлись верификация и оценка применимости предлагаемых соотношений модели.

На рис. 2, *а* представлены результаты расчета изменения объемов жидкости в каждом из баков, на рис. 2, *б* — изменения давлений в газовых полостях баков.

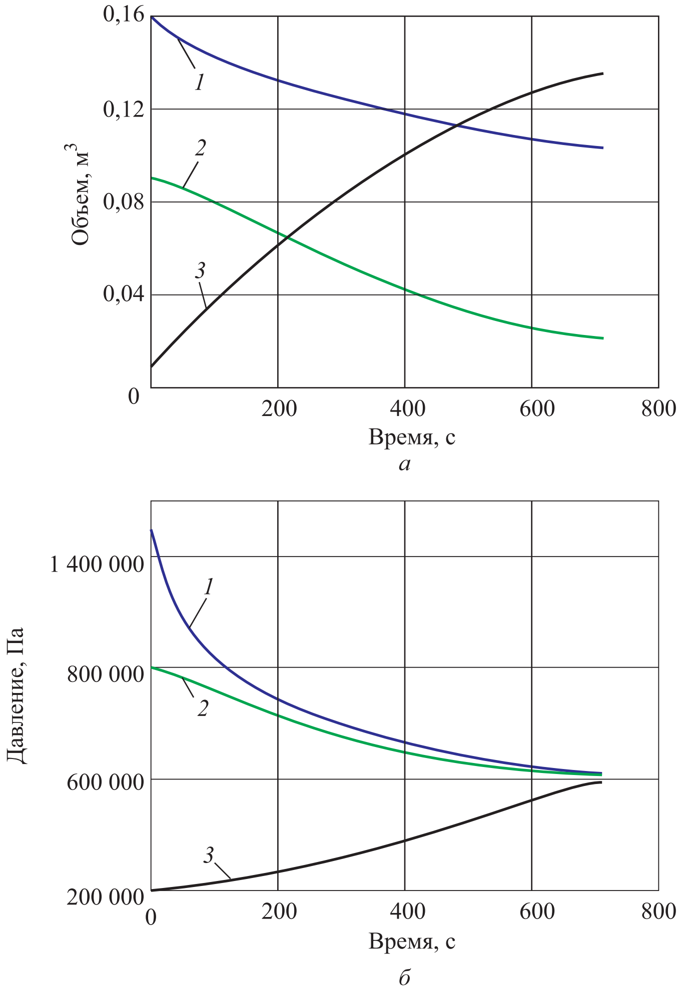

Рис. 2. Расчетное изменение объемов жидкости (*а*)
и давлений в газовых полостях (*б*) баков *1–3*

Анализ результатов расчета показывает адекватность и непротиворечивость расчетной модели. Представленные зависимости (см. рис. 2) отражают процессы выравнивания давлений между баками во времени и процессы перераспределения объемов жидкости между баками. Направления процессов соответствуют общим представлениям о закономерностях изменения состояния рассматриваемой системы. Очевидно, что система стремится к равновесию во всех частях с единым давлением, при этом происходит перераспределение объемов жидкости с сохранением общего объема жидкости неизменным.

Предложенные расчетные соотношения позволяют описывать перераспределение с течением времени идеальной жидкости в баках ОДУ под действием давления вытеснения в газовых полостях баков.

Соотношения могут быть использованы при разработке математической модели пневмогидросистем ОДУ, для прогнозирования и анализа процессов в системе при работах по управлению ОДУ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гусев А.А. *Гидравлика. Теория и практика*. Москва, Изд-во Юрайт, 2015, 285 с.

[2] Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. *Техническая термодинамика*. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 416 с.

Статья поступила в редакцию 10.02.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сысоев Д.В. Фундаментальные соотношения как основа математической модели объединенной двигательной установки МКС. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1509

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Сысоев Денис Вячеславович родился в 1974 г., окончил МАИ в 1998 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела анализа работы и обеспечения эксплуатации пневмогидравлических, энергетических и электромеханических систем космических аппаратов и средств выведения ОАО «РКК Энергия». Автор нескольких публикаций в области исследования электроракетных двигателей и управления космическими аппаратами. e-mail: denis-sysoev@yandex.ru

Fundamental relationship as the basis of ISS integrated propulsion system mathematical model

© D.V. Sysoev

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Korolev, Moscow region, 141070, Russia

The integrated propulsion system (IPS) of the International Space Station (ISS) as a pneumohydraulic system is the facility containing a large number of elements. Malfunction in the IPS operation may be critical for the ISS functioning. So, solving the modeling task and investigating the phenomenon of fluid and gas distribution between the capacities during the IPS operation is the essential task. To solve this problem, we developed a mathematical model of the system. According to the proposed relationships, we carried out numerical calculations for the model system containing three tanks. The initial boost gas pressure and liquid volumes in all tanks were given. As a model fluid we selected water, as a model gas we selected molecular nitrogen. The purpose of the calculation was testing the model relationships. The findings of the research show the adequacy and consistency of the model. The process directions are in accordance with the conceptions about the state change patterns in the described system. The relationships could be used in developing an IPS pneumohydraulic mathematical model, which makes it possible to assess and analyze the system processes while operating the IPS.

Keywords: *integrated propulsion system, pneumohydraulic system, modeling of fluid redistribution, mathematical model, analysis of system operation.*

REFERENCES

[1] Gusev A.A. *Gidravlika. Teoriya i praktika* [Hydraulics. Theory and practice]. Moscow, Yurait Publ., 2015, 285 p.

[2] Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering Thermodynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 416 p.

Sysoev D.V. (b. 1974) graduated from Moscow Aviation Institute in 1998. Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of the department of analysis of operating and maintaining pneumohydraulic, energetic, electrical and mechanical systems of spacecraft and launch vehicles, S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Author of a number of papers in the field of electric and rocket engine research and spacecraft control. e-mail: denis-sysoev@yandex.ru