

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД «ГАЗ – ЖИДКОСТЬ» В ТОПЛИВНЫХ БАКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ СТУПЕНЕЙ НА ПАССИВНЫХ УЧАСТКАХ ПОЛЕТА

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина;
e-mail: ¹odnikolayev@gmail.com; ²ibloha@i.ua; ³khoryak@i.ua

Для осуществления программных перемещений в пространстве космические ступени жидкостных ракет-носителей (РН) оснащаются маршевыми двигателями многократного включения. Во время полета космической ступени после останова ее маршевого двигателя жидкое топливо в баке в условиях микрогравитации по инерции перемещается вверх, максимально отдаляясь от заборного устройства, что создает потенциальную возможность проникновения газа наддува на вход в двигатель в количествах, недопустимых для повторного запуска двигателя. В связи с этим определение параметров движения жидкости в топливных баках в условиях микрогравитации является актуальной задачей, требующей своего решения при проектировании жидкостных ракетных двигательных установок. В настоящей работе разработана методика для теоретического определения параметров движения границы раздела сред «газ – жидкость» в полостях топливных баков современных космических ступеней жидкостных РН в условиях микрогравитации (в период между запуском и остановом их маршевых двигателей) с учетом конструктивных особенностей внутрибаковых устройств обеспечения сплошности жидких компонентов топлива. Методика основана на использовании метода конечных элементов, метода объема жидкости и современных компьютерных средств конечно-элементного анализа (CAE-систем). Она позволяет определять на пассивном участке полета космической РН параметры движения и формы свободной поверхности жидкости в баке, параметры формирующихся свободных газовых включений, эффективность внутрибаковых средств обеспечения сплошности компонентов топлива при «штатном» функционировании двигательной установки космической ступени.

Применительно к условиям движения экспериментального образца топливного бака с жидкостью в «бросковой башне», воспроизводящей явление микрогравитации, выполнено численное моделирование движения жидкости в цилиндрическом баке с учетом деформации ее свободной поверхности. Полученные в результате моделирования значения параметров движения жидкости и границы раздела сред «газ – жидкость» согласуются с экспериментальными данными.

Использование разработанного методического обеспечения позволит сократить объем экспериментальной отработки новых и модернизируемых космических ступеней РН.

Ключевые слова: жидкостной ракетный двигатель, топливный бак, внутрибаковые средства обеспечения сплошности компонентов жидкого топлива, микрогравитация, форма свободной поверхности жидкости, параметры газовых включений в жидкость, «бросковая» башня, численное моделирование, метод конечных элементов

1. Издалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шептун Ю. Д. Ракета как объект управления. Днепропетровск: АРТ-Пресс, 2004. 544 с.
2. Kashanov O. E., Degtyarev O. V., Pylypenko O. V., Zavaloka O. M., Nikolayev O. D., Sviridenko M. F. Ensuring operating efficiency of ilv space stages propellant feeding systems in different operating conditions IAC-15-D.2.3, 66th Astronautical Congress International. 7 pp.
3. Ducret E., Le Moullec L., Spencer B., Balaam P. Propellant management device studies, computational methods and neutral buoyancy tests. AIAA 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1992. P. 92–3611.
4. Козлов А. А., Новиков В. Н., Соловьев Е. В. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок. М.: Машиностроение, 1988. 352 с.
5. Пилипенко О. В., Заволока А. Н., Николаев А. Д., Свириденко Н. Ф. Работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевой двигательной установки космических ступеней ракет-носителей Сб. науч. тр. «Аэрогазодинамика: проблемы и перспективы». 2006. Вып. 2. С. 88–100.
6. Перфильев Л. А., Подобедов Г. Г., Соколов Б. А. Исследование вопросов гидромеханики в условиях невесомости на борту орбитальной станции «Мир». Известия РАН: Энергетика. 2003. № 4. С. 44–50.
7. Zhang-Guo LI, Qiu-Sheng LIU, Rong LIU, Wei HU, Xin-Yu DENG. Influence of Rayleigh–Taylor Instability on Liquid Propellant Reorientation in a Low-Gravity Environment. Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd. 2009. Vol.26, No.11. P.114701-1-114701-4.

8. Behruzi Ph., Michaelis M., Khimeche G. Behavior of the Cryogenic Propellant Tanks during the First Flight of the Ariane 5 ESC-A Upper Stage. 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, AIAA 2006-5052. 9–12 July 2006. 10 p.
9. Investigation of Propellant Sloshing and Zero Gravity Equilibrium for the Orion Service Module Propellant Tanks: final report / Microgravity University. Systems Engineering Educational Discovery. Kenosha. 2009. 22 p.
10. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981. № 39 (1). P. 201–225.
11. Kohnke P. Ansys Inc. Theory Manual. 001369. Twelfth Edition. Canonsburg : SAS IP, 2001. 1266 p.
12. Bussmann M., Mostaghimi J., Chandra S. On a three dimensional volume tracking model of droplet impact *Phys. Fluids*. 1999. 11(6). P. 46.
13. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Comput. Phys*. 1992. Vol. 100. No. 2, June. pp. 335–354.
14. Pozdnyshev N. O. Development the capillary devices of launch vehicle tanks and peculiarities of hydrodynamic processes simulation occurring in them. IAC-14-A2.2.3. URL: <http://toc.proceedings.com/25520webtoc.pdf> (last accessed 17.10.2017).
15. Микишев Г. Н., Чурилов Г. А. Влияние поверхностного натяжения и угла смачивания на колебания жидкости в сосудах. *Динамика КА и исследование космического пространства*. М.: Машиностроение, 1986. С. 164–175.
16. Пилипенко О. В., Дегтярев А. В., Заволока А. Н., Кашанов А. Э., Николаев А. Д., Свириденко Н. Ф., Башлий И. Д. Определение параметров газожидкостных структур, формирующихся в компонентах топлива при запуске маршевого двигателя космической ступени с малыми уровнями заполнения ее баков. *Техническая механика*. 2014. № 4. С. 3–13.
17. Блоха И. Д., Заволока А. Н., Николаев А. Д., Свириденко Н. Ф. Влияние продольных вибраций верхней ступени ракеты-носителя на работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевого двигателя. *Техническая механика*. 2005. №2. С. 65–74.
18. Давыдов С. А. Расчёт коэффициента проникновения затопленной струи жидкости через тканую металлическую сетку. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровськ, 2004. Вип. V. С. 13–21.
19. Сичевой А. В., Давыдов С. А., Горелова К. В. Коэффициент динамического нагружения сетчатых средств обеспечения сплошности топлива. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетровськ, 2010. Вип. X. С. 106–113.
20. Hutchinson B. R., Raithby G. D. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy. *Numerical Heat Transfer*, 1986. 511 p.
21. Chorin A. J. Numerical solution of navier-stokes equations. *Mathematics of Computation*. 1968. P. 745–762.
22. Salzman J. A., Masica W. J., Lacovic R. F. Low-gravity reorientation in a scale-model Centaur liquid-hydrogen tank (NASA TN D-7168, 1973). Официальный сайт NASA – URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19730007525> (last accessed 17.10.2017).
23. The Bremen Drop Tower. Официальный сайт University Bremen. URL: <https://www.zarm.uni-bremen.de/en/drop-tower/team.html> (last accessed 17.10.2017).