НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Исследование режимов эксплуатации хранилищ сжиженного природного газа в составе оборудования наземных комплексов

03, март 2014

DOI: 10.7463/0314.0700530

Королев Н. С., Бармин И. В., Чугунков В. В.

УДК 629.7.082.6

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

hocleric@rambler.ru

sm8@sm8.bmstu.ru

Введение

Одним из наиболее масштабных проектов в развитии отечественной космонавтики в настоящее время является создание космодрома «Восточный», на котором осуществляется строительство наземных комплексов для ракет космического назначения «Союз-2.1а», «Союз-2.1б», «Союз 2.1в» и в ближайшее время будут построены объекты наземной инфраструктуры для РКН «Ангара». Помимо наземных комплексов для «Союзов» и «Ангары», на космодроме «Восточный» предполагается создание наземных комплексов для семейства РКН сверхтяжелого класса и многоразовой ракетно-транспортной системы, у которой ракетные блоки первой ступени могут быть оснащены двигательными установками, функционирующими на новом ракетном горючем – сжиженном природном газе (СПГ) в паре с окислителем - жидким кислородом [1].

Применение СПГ в ракетно-космической технике обусловлено рядом преимуществ по сравнению с ракетным керосином: более высокая энергетика, меньшая стоимость и более высокая чистота сгорания при соединении с жидким кислородом, а также самопроизвольное испарение и удаление остатков топлива из топливных магистралей после выключения двигательной установки, что облегчает условия ее многократного использования. В связи с этими обстоятельствами в настоящее время активно проводятся работы по испытанию и отработке ракетных двигателей, работающих на сжиженном природном газе [2].

Проведение испытаний двигателей и в последующем эксплуатация ракетных комплексов требует создания хранилищ СПГ в составе наземного технологического оборудования и обеспечения условий их безопасной эксплуатации.

1. Постановка задачи

Одними из факторов опасности СПГ являются его низкая температура кипения (110,7...111,5К в зависимости от состава), что не позволяет обеспечить его хранение без потерь, а также изменение состава, плотности и температуры кипения СПГ при хранении за счет испарения более легкого компонента - метана. Данные факторы при пополнении хранилищ, имеющих остатки топлива, новой порцией СПГ, с плотностью и температурой, отличающейся от аналогичных параметров в остатке топлива, могут приводить к образованию стратифицированных макрослоев СПГ в хранилище [5,6]. При последующем протекании тепломассообменных процессов в стратифицированных слоях СПГ, приводящих к изменению их плотности, возможно возникновение режима интенсивного перемешивания, получившего название «ролловер», с практически мгновенным испарением больших масс СПГ и резким повышением давления в хранилище, способным привести к его разрушению с катастрофическими последствиями [10].

На основе вышесказанного, сформулированы цели работы, которые заключаются в разработке методики для прогнозирования параметров СПГ при эксплуатации в различных режимах хранилищ топлива данного вида, в том числе и для режима ролловера, в сопоставлении результатов расчетов параметров СПГ с экспериментальными данными и в определении возможных рекомендаций для безопасной эксплуатации хранилищ СПГ в составе оборудования наземных комплексов.

2. Обзор источников по рассматриваемой тематике

Существует несколько зарубежных и российских публикаций, посвященных отдельным вопросам и процессам, протекающим при эксплуатации хранилищ СПГ, в том числе и при возникновении в них режима ролловера.

В монографии [3] приводятся характеристики криогенных резервуаров, применяемых в составе оборудования наземных комплексов, которые могут быть использованы для хранения СПГ.

В публикации [10] приведены эксплуатационные данные о параметрах ролловера, приведшего к разрушению хранилища СПГ с катастрофическими последствиями. В работах [11,12] опубликованы экспериментальные данные о параметрах СПГ при возникновении ролловера в вертикальном цилиндрическом хранилище французской компанией Gaz de France.

В работах [4-8] приведены математические модели тепломассообменных процессов и расчетные значения пикового давления в хранилище СПГ при возникновении ролловера, а также времени его наступления после пополнения резервуара новой порцией топлива. Математические

модели тепломассообменных процессов в хранилище СПГ [5,6] основаны на уравнениях термодинамики необратимых процессов в бинарной смеси метан-этан вида:

$$\rho \frac{di}{dt} = \lambda \nabla^2 T + div\left[\left(i_1 - i_2\right) \rho D \left(\nabla m + k_T \frac{\nabla T}{T} + k_p \frac{\nabla p}{p} \right) \right] \quad (1)$$

где ρ, i – плотность и энтальпия смеси; λ, D – коэффициенты теплопроводности и взаимодиффузии; i_1, i_2 – энтальпии компонентов смеси; m - относительная массовая концентрация i - го компонента; k_T , k_P – термодиффузионное и бародиффузионное отношения, p, T –давление и температура смеси, t – время.

Состав СПГ для использования в ракетно-космической технике регламентирован техническими условиями [9], согласно которым помимо основных составляющих метана и этана в СПГ могут присутствовать и другие компоненты в существенно меньшем количестве.

Для проверки достоверности результатов моделирования процессов в СПГ, представленного бинарной смесью метан-этан в соответствии с уравнением (1) и моделями [5,6], проведено сопоставление расчетных значений с экспериментальными данными для режима хранения СПГ в резервуаре наземного испытательного комплекса ракетных двигателей в ФКП «НИЦ РКП».

3. Описание условий проведения и результатов эксперимента для режима хранения СПГ в резервуаре наземного испытательного комплекса

Перед проведением испытания ракетного двигателя СПГ в режиме хранения находился в вертикальном цилиндрическом криогенном резервуаре высотой 10 м с объемом 25,6 м^3, внутри которого по его оси на различных высотах были установлены датчики температуры.

Исходные данные по СПГ для моделирования режима хранения соответствовали паспорту поставщика компонента, содержащего 97,27 % метана и 2,73 % остальных примесей.

Результаты проведенного эксперимента и моделирования изменения температуры СПГ в режиме хранения представлены на рисунке 1.

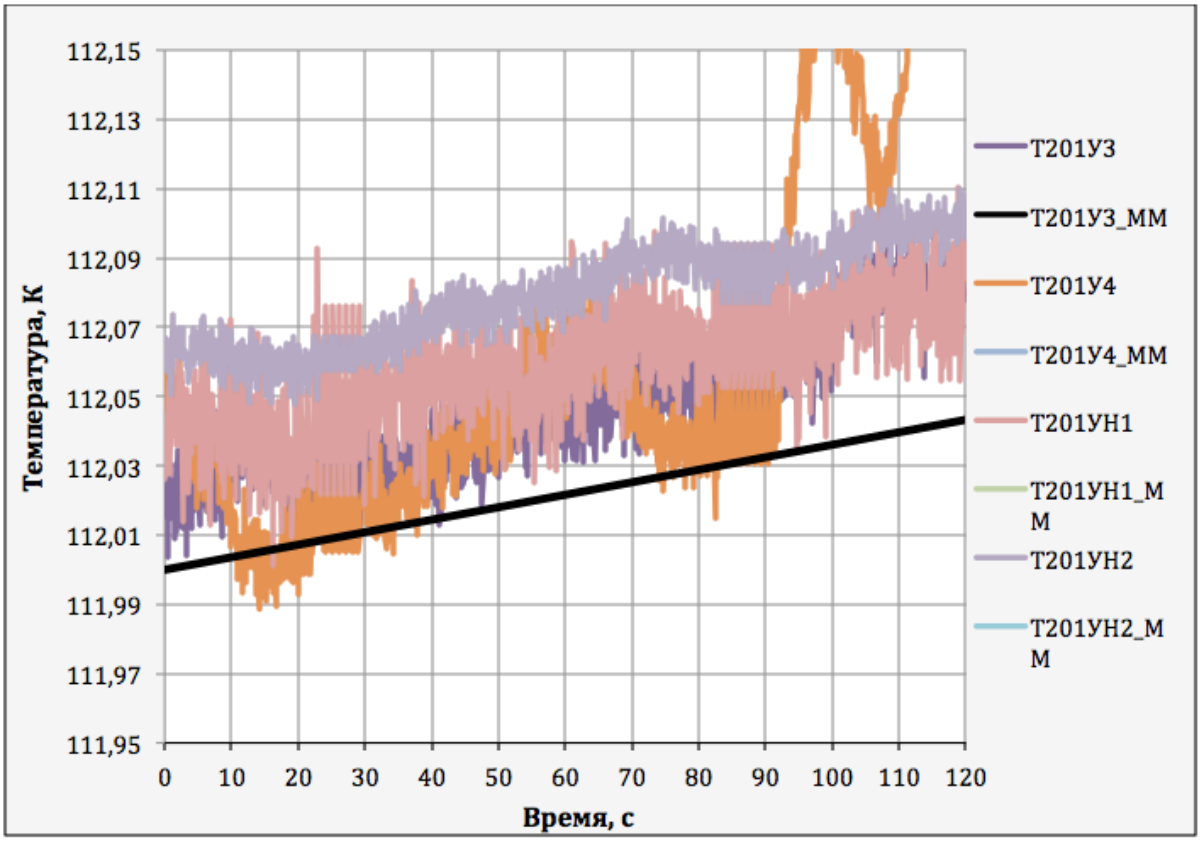

Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений температуры в резервуаре наземного комплекса в режиме хранения СПГ

Относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений температуры не превышает 1%, что свидетельствует о правомерности применения математических моделей, основанных на уравнениях термодинамики необратимых процессов в бинарной смеси метан-этан для прогнозирования параметров СПГ при эксплуатации хранилищ в составе оборудования наземных комплексов. Колебание значений температуры при реальных условиях вызвано высокой чувствительностью установленных датчиков температуры. Имеющееся отклонение между расчетной и экспериментальными температурами СПГ в местах установки датчиков обусловлено представлением в расчетах СПГ бинарной смесью метан-этана, реальный же компонент имеет и некоторое количество тяжелых углеводородов [9].

4. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для режимов ролловера СПГ, возникающих после пополнения хранилищ новой порцией топлива

Достоверность разработанных моделей тепломассобменных процессов в стратифицированном по плотности и температуре СПГ в хранилище с возникновением условий для режима ролловера после пополнения хранилищ новой порцией топлива [5,6], проверена сопоставлением расчетных характеристик с экспериментальными данными, представленными в публикациях [10-12].

4.1. Сопоставление с экспериментальными данными компании Gaz de France.

Параметры по составу газа, геометрии хранилища и экспериментальным значениям характеристик СПГ взяты из публикаций компании Gaz de France [11,12]. Результаты сравнения экспериментальных данных и характеристик компонента, полученных моделированием на основе уравнений термодинамики необратимых процессов для метан-этановой смеси, представлены на рисунках 2 и 3.

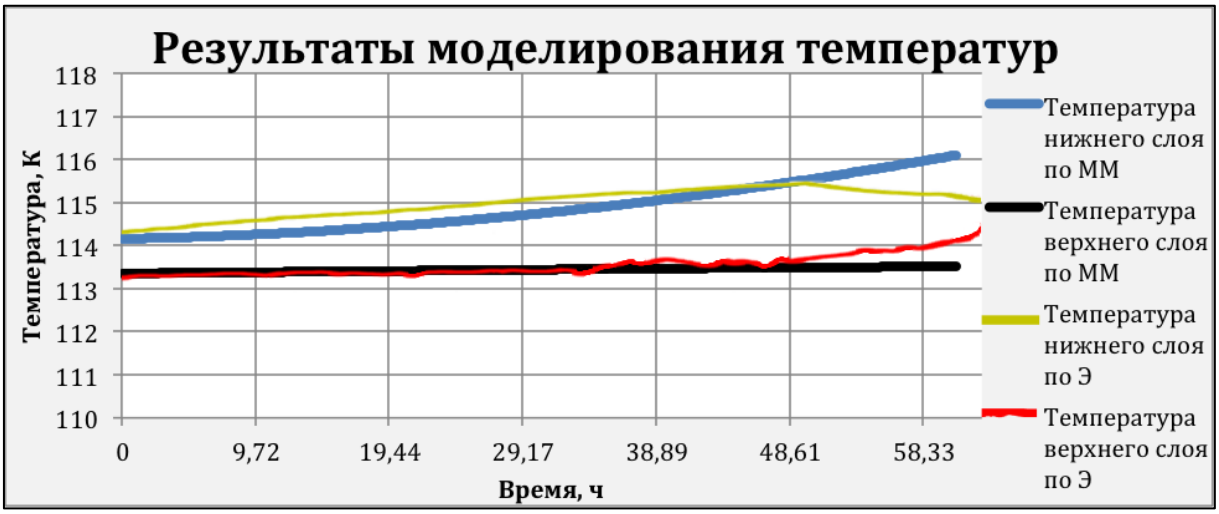

Рис. 2. Сопоставление расчетных (ММ) и экспериментальных (Э) температур стратифицированных слоев СПГ после пополнения хранилища новой порцией топлива на полигоне компании Gaz de France

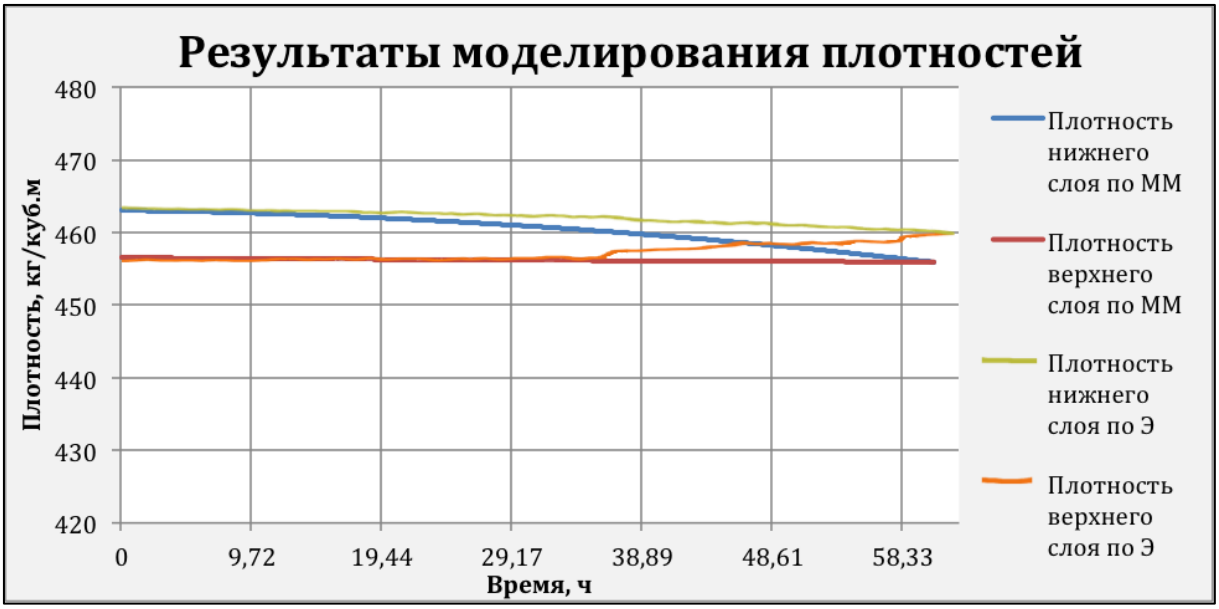

Рис. 3. Сопоставление расчетных (ММ) и экспериментальных (Э) плотностей стратифицированных слоев СПГ после пополнения хранилища новой порцией топлива на полигоне компании Gaz de France

Режим ролловера СПГ в хранилище начинается после выравнивания плотностей верхнего и нижнего слоев топлива. По результатам расчетов время до наступления ролловера в соответствии с математической моделью составило 60,7 часа, что отличается от экспериментально определенного времени на 2,7%. Относительная погрешность прочих моделируемых характеристик (плотности, температуры) не превышает 2,5%.

4.2. Сопоставление с экспериментальными данными при аварии хранилища из-за ролловера СПГ.

Параметры по составу газа, геометрии хранилища и экспериментальным значениям характеристик СПГ взяты из работы [10]. Результаты сравнения экспериментальных данных и характеристик компонента, полученных моделированием на основе уравнений термодинамики необратимых процессов для метан-этановой смеси, представлены на рисунках 4 и 5.

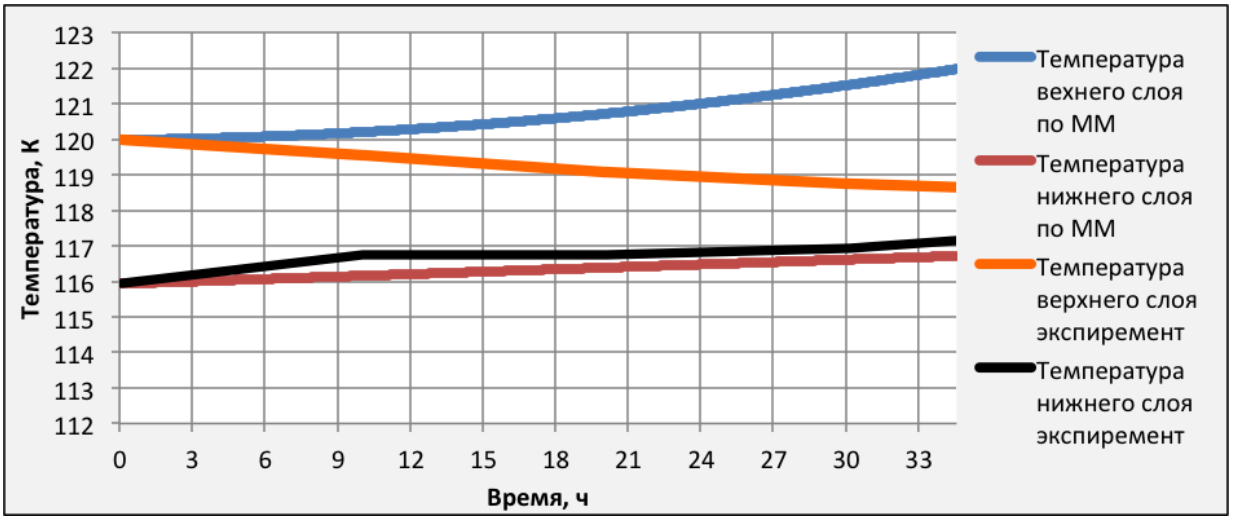

Рис. 4. Сопоставление расчетных (ММ) и экспериментальных температур стратифицированных слоев СПГ после пополнения хранилища новой порцией топлива при аварии хранилища из-за ролловера СПГ

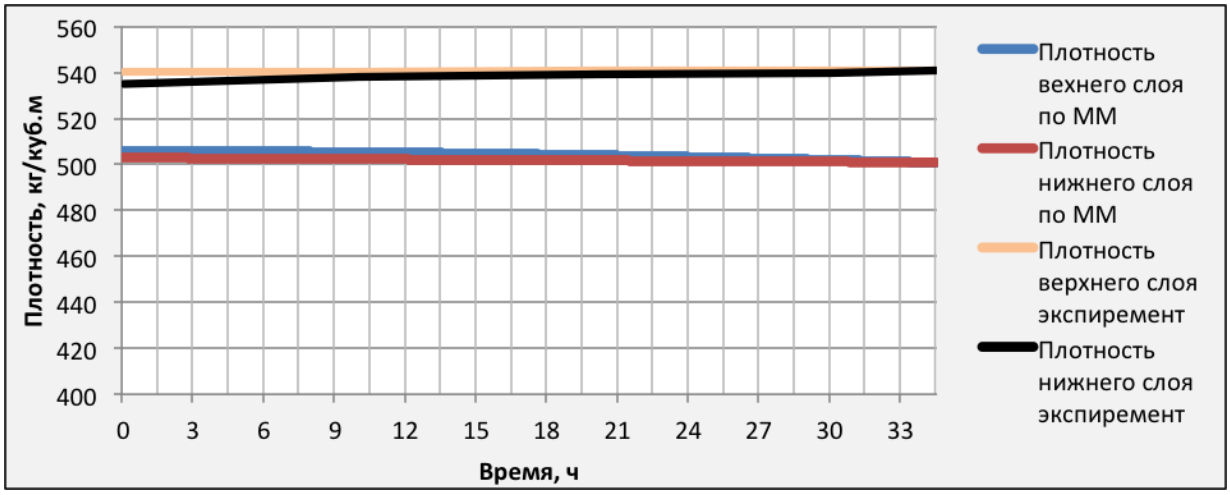

Рис. 5. Сопоставление расчетных (ММ) и экспериментальных плотностей стратифицированных слоев СПГ после пополнения хранилища новой порцией топлива при аварии хранилища из-за ролловера СПГ

По результатам расчетов время до наступления ролловера в соответствии с математической моделью составило 34,5 часа, что отличается от экспериментально определенного времени на 4,2%. Относительная погрешность прочих моделируемых характеристик (плотности, температуры) не превышает 8,2%. Увеличение погрешностей расчетных величин в данном случае обусловлена составом СПГ, в котором присутствовал помимо метана пропан, а не этан.

При применении в математической модели метан-пропаноаой смеси погрешность определения расчетных параметров СПГ в хранилище снижается до 2%.

Основные выводы и рекомендации

Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов позволяют сделать вывод о возможности применения методического аппарата [5-8], основанного на уравнениях термодинамики необратимых процессов в бинарной смеси метан-этан для прогнозирования режимных параметров эксплуатации хранилищ СПГ в составе оборудования наземных комплексов.

Методы исключения режима ролловера при эксплуатации хранилищ СПГ в составе оборудования наземных комплексах могут быть основаны на поддержании стабильного состава СПГ в хранилище и организации перемешивания топлива при выполнении операций пополнения хранилища новыми порциями топлива и при сливе его из топливных баков ракеты при отмене старта.

Достоверность разработанных моделей тепломассобменных процессов в стратифицированном Перед проведением испытания ракетного двигателя СПГ в режиме хранения находился в

вертикальном цилиндрическом криогенном резервуаре высотой 10 м с объемом 25,6 м^3, внутри которого по его оси на различных высотах были установлены датчики

Существует несколько зарубежных и российских публикаций, посвященных отдельным вопросам и процессам, протекающим при эксплуатации хранилищ СПГ, в том числе

Список литературы

1. Бармин И.В., Зверев В.А., Украинский А.Ю., Чугунков В.В., Языков А.В. Обоснование некоторых основных характеристик стартового оборудования космодромов XXI века // Инженерный журнал: Наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 3. Режим доступа: http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/630.html (дата обращения 01.02.2014).

2. Кузин А.И., Рачук В.С., Коротеев А.С., Каторгин Б.И., Смирнов И.А. Вахниченко В.В., Лозин С.Н., Лехов П.А., Семенов А.И., Иевлев А.В., Ефимочкин А.Ф., Клепиков И.А., Лихванцев А.А., Петров В.И., Ромашкин А.М., Гусев Ю.Г., Яковлев А.Г. Обоснование выбора компонентов ракетного топлива для двигательных установок первой ступени многоразовой ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 1. С. 19-55.

3. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ: вчера, сегодня, завтра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.

4. Королев Н.С. Анализ возникновения явления «ролловер» в системах хранения сжиженного природного газа // XXXVI академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики»: материалы. М.: Комиссия РАН, 2012. С. 353-354.

5. Королев Н.С. К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/345773.html (дата обращения 01.02.2014).

6. Королев Н.С. Математическое моделирование явления ролловер в системах хранения сжиженного природного газа // XXXVII академические чтения по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики»: материалы. М.: Комиссия РАН, 2013.

7. Королев Н.С. Влияние состава сжиженного природного газа и технологических характеристик хранилищ стартового оборудования на время наступления явления ролловера // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/552136.html (дата обращения 01.02.2014). DOI: 10.7463/0213.0552136

8. Королев Н.С., Бармин И.В. Методика оценки пикового давления в газовой подушке хранилища сжиженного природного газа стартового комплекса при возникновении ролловера // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. № 6. С. 7-11. Режим доступа: http://izvuzmash.bmstu.ru/catalog/calcmach/hidden/244.html (дата обращения 01.02.2014).

9. ТУ 021 00480689-96. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для ракетной техники. СПб.: ГИПХ. 1996.

10. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.

11. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mlng storage tank of the nantes cryogenic testing station. Paris, France: Gaz de France, 2003.

12. The European fuels conference 11th annual meeting // Hydrocarbon World. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. C. 35-38.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Operation modes research of liquefied natural gas storages as a part of the ground complexes equipment

03, March 2014

DOI: 10.7463/0314.0700530

N.S. Korolev, I.V. Barmin, V.V. Chugunkov

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

hocleric@rambler.ru

sm8@sm8.bmstu.ru

The use of the Liquefied Natural Gas (LNG) in the space-rocket equipment is motivated by some advantages. That is why a lot of tests and works are actively carried out now on rocket engines using liquefied natural gas.

To provide the engine tests and subsequent rocket complex operation a creation of LNG storages is demanded as a part of ground processing equipment and support for their safe operation conditions.

One of LNG danger factor is its low boiling temperature, and also changing the condition, density and LNG boiling temperature at storage due to evaporation of light component, namely methane. At refill of the storages having fuel remains with a new LNG portion these factors can lead to formation of the stratified macro-layers and cause a mode of the intensive mixing that is called "rollover", with almost instant evaporation of LNG big mass and sharp pressure boost, capable to result in the storage distraction with catastrophic effects.

The work objectives are formulated such as a technique development for forecasting of the LNG parameters in operating storages including the rollover mode, a comparison of calculated results of the LNG parameters with the experimental data, and a definition of possible recommendations for safe operation of LNG storages as a part of the ground complexes equipment.

The paper reviews 12 publications concerning the issues and proceeding processes at operation of LNG storages, including the rollover mode.

To verify the reliability of process simulation results in the LNG, represented in models by the binary methane-ethane mixture the calculated values have been compared with the experimental data for a LNG storage mode in the reservoir of a ground test complex.

The reliability of developed models of the heat-mass-exchange processes in stratified on density and temperature in LNG storage with emergence of conditions for the rollover mode has been verified by comparing the settlement characteristics to the published experimental data. The estimated time before a rollover differs from the experimental value by 2,7%. The relative error of other modelled characteristics of LNG does not exceed 2,5%.

Conclusions are drawn on the possibility to use the technique based on the thermodynamics equations of irreversible processes in a binary methane-ethane mixture to forecast working parameters of LNG storages operation as a part of the ground complexes equipment. The techniques to except the rollover mode can be based on keeping a stable LNG composition in the storage and arranging the fuel mixing when performing operations of storage refill and its draining from rocket fuel tanks at start cancellation.

Publications with keywords: launching equipment, rocket fuel, liquefied natural gas, storage systems
Publications with words: launching equipment, rocket fuel, liquefied natural gas, storage systems

---

References

1. Barmin I.V., Zverev V.A., Ukrainskiy A.Yu., Chugunkov V.V., Yazykov A.V. [Justification of some basic characteristics for the launch equipment of the 21st Century spaceports]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii - Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 3. Available at: http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/630.html , accessed 01.02.2014.

2. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., Katorgin B.I., Smirnov I.A. Vakhnichenko V.V., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Ievlev A.V., Efimochkin A.F., Klepikov I.A., Likhvantsev A.A., Petrov V.I., Romashkin A.M., Gusev Yu.G., Yakovlev A.G. [Justification of the choice of components of rocket fuel for propulsion of the first stage of reusable space-rocket systems]. *Aviakosmicheskaia tekhnika i tekhnologiia* , 2010, no. 1, pp. 19-55.

3. Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyi prirodnyi gaz vchera, segodnia, zavtra* [Liquefied natural gas: yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 256 p.

4. Korolev N.S. [Analysis of occurrence of the phenomenon "rollover" in storage systems of liquefied natural gas]. *36 akademicheskie chteniya po kosmonavtike "Aktual'nye problemy rossiyskoy kosmonavtiki": materialy* [Proc. of the 36th Academic Readings on Astronautics "Actual problems of Russian astronautics"]. Moscow, RAS Commission Publ., 2012, pp. 353-354.

5. Korolev N.S. [Mathematic rollover model in LNG storage tank]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU,* 2012, no. 3. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/345773.html , accessed 01.02.2014.

6. Korolev N.S. [Mathematical modeling of phenomena of rollover in the systems of storage of liquefied natural gas]. *37 akademicheskie chteniya po kosmonavtike "Aktual'nye problemy rossiyskoy kosmonavtiki": materialy* [Proc. of the 37th Academic Readings on Astronautics "Actual problems of Russian astronautics"]. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 383-384.

7. Korolev N.S. [Influence of liquefied natural gas composition and functional specifications of storages of launching equipment on rollover phenomenon time]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana - Science and Education of the Bauman MSTU,* 2013, no. 2. DOI: 10.7463/0213.0552136

8. Korolev N.S., Barmin I.V. [Assessment Method for the peak pressure in a Gas Cushion of liquefied natural Gas Storage at Launch Complex if a Rollover]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building.* 2013, no. 6, pp. 7-11. Available at: http://izvuzmash.bmstu.ru/catalog/calcmach/hidden/244.html , accessed 01.02.2014.

9. *TU 021 00480689-96. Gaz goriuchii prirodnyi szhizhennyi. Toplivo dlia raketnoi tekhniki* [Technical Specification 021 00480689-96. Combustible natural liquefied gas. Fuel for the rocketry]. St. Petersburg, GIPKh Publ., 1996.

10. May E.F. *Fluid Science for improved LNG Production and shipping*. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.

11. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. *Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mlng storage tank of the nantes cryogenic testing station*. Paris, France: Gaz de France, 2003.

12. The European fuels conference 11th annual meeting. *Hydrocarbon World*. Paris, France, World Refining Association, 2010, vol. 4, iss. 2, pp. 35-38.