Влияние состава сжиженного природного газа и технологических характеристик хранилищ стартового оборудования на время наступления явления ролловера

 # 02, февраль 2013

DOI: 10.7463/0213.0552136

Королев Н. С.

УДК 629.7.082.6

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

hocleric@rambler.ru

Введение

Актуальность исследования поведения сжиженного природного газа (СПГ) в системах хранения горючего на стартовых комплексах обуславливается преимуществами применения пары жидкий кислород – СПГ для ракет-носителей различного класса, поскольку СПГ, как горючее, имеет ряд преимуществ при использовании вместо ракетного керосина [1].

В настоящее время проводятся работы по обоснованию технического облика многофазовой ракетно-космической системы, для которой применение пары компонентов топлива жидкий кислород - СПГ является наиболее перспективной из-за высоких энергетических характеристик, чистоты сгорания топлива, его меньшей стоимости по сравнению с авиационным керосином и жидким водородом [2, 3].

Постановка задачи

При использовании СПГ в системах хранения на стартовом комплексе существует возможность протекания негативного явления, получившего название «ролловер», возникающего при дозаправке емкости хранилища новой дозой СПГ, физические параметры которой отличаются от имеющейся, с возникновением через некоторое время перемешивания новой и имеющейся в хранилище порций СПГ с резким увеличением давления в газовой подушке [4, 5]. Данный рост давления может

привести к разрушению хранилища и разливу компонента, а при возникновении искры и к пожару на стартовом комплексе космодрома.

Время наступления процесса перемешивания СПГ с резким увеличением давления после дозаправки хранилища по проведенным оценкам [4, 6] и экспериментальным данным [7] может составлять от нескольких часов до десятков часов.

Определение времени наступления ролловера является важным вопросом безопасности при хранении СПГ на стартовых комплексах. Из-за разных технологических систем хранения, в случае малого времени до протекания явления, необходимо применение специальных средств для исключения последствий ролловера, которые должны предусматриваться при проектировании данной системы.

Методы исследования

Исследование влияние различных факторов на время наступления ролловера проводилось на основе анализа результатов, полученных численным моделированием [4,5] различных условий хранения СПГ и характеристик хранилищ.

Хранилища СПГ подразделяются на горизонтальные цилиндрические, вертикальные цилиндрические и сферические [5]. Для каждого из этих типов, внешний теплоприток рассчитывается по разному, поэтому и исследования должны проводиться отдельно.

В основу моделирования тепломассообменных процессов при ролловере в хранилищах СПГ стартовых комплексов положено уравнение термодинамики необратимых процессов [8]:

$$\rho \frac{dq}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \text{div} \left[(i_1 - i_2) \rho D \left(\nabla m + k_T \frac{\nabla T}{T} + k_P \frac{\nabla P}{P} \right) \right],$$

где $\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ – средняя плотность смеси, и каждого из компонентов соответственно;

$i = i_1 c_1 + i_2 c_2$ – средняя энтальпия смеси, и каждого из компонентов соответственно;

λ – коэффициент теплопроводности;

T – температура;

c_1, c_2 – концентрации компонентов;

D – коэффициент взаимодиффузии;

k_T, k_P – термодиффузионное и бародиффузионное отношения;

P и t – давление и время.

Данное уравнение дополнялось уравнениями, описывающими квазистационарную теплопередачу через стенки хранилищ [9] и начальные параметры порций СПГ после пополнения хранилищ. Полученная система уравнений решалась методом конечных разностей, а правомерность полученных результатов проверялась сравнением с опубликованными экспериментальными данными [7] протекания явления ролловер в вертикальном хранилище с объемом 500 м^3 [10] с характеристиками стратифицированных слоев СПГ, представленными в таблице 1 [7].

Таблица 1.

Характеристика верхнего и нижнего слоев СПГ в экспериментальном хранилище [7]

	Нижний слой	Верхний слой
Молярная концентрация компонента, %		
<i>Метан</i>	79,4	83,1
<i>Этана и прочее</i>	20,6	16,9
Основные физические параметры		
<i>Плотность кг/м^3</i>	463,1	456,5
<i>Температура, К</i>	114,15	113,35

Время до наступления явления ролловер, определяемое по моменту выравнивания плотностей СПГ в нижнем и верхнем слоях газа, в экспериментальном хранилище объемом 500 м^3 составило 62,4 часа после дозаправки хранилища второй дозой [7].

Результаты моделирования изменения средних плотностей и температур слоев СПГ в сравнении с экспериментальными данными [7] представлены на рис. 1 и 2.

Рис. 1. Сопоставление изменения средних плотностей слоев СПГ от времени по результатам численного расчета и эксперимента [7]

Рис. 2. Сопоставление изменения средних температур слоев СПГ от времени по результатам численного расчета и эксперимента [7]

При численном моделировании явления ролловера время до его наступления составило 60,7 часа, что отличается от экспериментального значения на 2,7 %. Остальные расчетные характеристики по сравнению с экспериментальными данными имеют следующие погрешности:

- температура верхнего слоя - 1,1 %;

- температура нижнего слоя - 0,5 %;
- плотность верхнего слоя - 0,9 %;
- плотность нижнего слоя - 0,9 %;
- разница плотностей слоев – 3 %.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам выполненных расчетов выявлено, что время до наступления явления зависит от состава СПГ, а так же степени заполнения, характеристик изоляции и геометрии хранилища. В качестве варьируемых параметров, влияющих на время возникновения ролловера в хранилищах СПГ, при проведении расчетного анализа использовались следующие величины:

1. Термическое сопротивление изоляции;
2. Геометрия хранилища при сохранении постоянного объема (для вертикальных и горизонтальных цилиндрических хранилищ);
3. Концентрация компонентов слоев (разность концентраций метана между слоями);
4. Степень заполнения хранилища предыдущей и последующей дозами СПГ.

На рис. 3-6 приведены результаты расчетов для горизонтально расположенных цилиндрических хранилищ.

Рис. 3. Влияние изменение характеристики изоляции на время наступления явления ролловера

Рис. 4. Влияние изменения геометрии хранилища на время наступления явления ролловера при постоянном объеме

Рис. 5. Влияние начальной концентрации метана на время наступления явления ролловера в нижнем стратифицированном слое

Рис. 6. Влияние степени заполнения нижнего слоя на время наступления явления ролловера

Данные расчетов для цилиндрических вертикальных и сферических хранилищ имеют схожий характер.

Увеличение времени до наступления ролловера происходит при увеличении термического сопротивления изоляции хранилища, увеличении радиуса хранилища (однако изготовление хранилищ с большим радиусом может вызвать ряд технологических трудностей при изготовлении обечаек, а так же создание дополнительных препятствий при их транспортировке и размещении на космодроме [5]) при постоянном объеме за счет уменьшения его длины, при увеличении разности концентраций метана между слоями, а также при увеличении объема нижнего с учетом одинаковой степени заполнения хранилищ СПГ суммарной дозой. Увеличение времени позволяет применять ряд технических решений для предотвращения ролловера в хранилище СПГ на космодроме: применение барботажа с использованием самого компонента или применение замкнутых насосных систем перекачки компонента из емкости в емкость [5]. Выбор безопасного способа хранения СПГ позволит снизить стоимость системы заправки стартового комплекса.

Список литературы

1. Исследование вопросов производства и использования СПГ в качестве альтернативного топлива в различных отраслях народного хозяйства: отчет / «Крион» при МЭИ. М., 1994. 125 с.

2. Кузин А.И., Лозин С.Н., Лехов П.А., Семенов А.И., Мамин В.В. Исследования ГКНПЦ им. М. В. Хруничева по обоснованию многоразовой требуемой размерности ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 1. С. 3-12.
3. Кузин А.И., Рачук В.С., Коротеев А.С. и др. Обоснование выбора компонентов ракетного топлива для двигательных установок первой ступени многоразовой ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 1. С. 19-55.
4. Королев Н.С. Математическое моделирование явления ролловер в системах хранения сжиженного природного газа // Актуальные проблемы российской космонавтики: материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2013. С. 383-384.
5. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / Под ред. А.М. Архарова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.
6. Королев Н.С. Анализ возникновения явления «ролловер» в системах хранения сжиженного природного газа // Актуальные проблемы российской космонавтики: Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН, 2012. С. 353-354.
7. The European fuels conference 11th annual meeting // HYDROCARBON WORLD. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. С. 35-38.
8. 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.edu.ru/doc/345773.html> (дата обращения 01.12.2012).
9. Чугунков В.В. Теплопередача при сложном теплообмене на поверхностях конструкций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 28 с.
10. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mIng storage tank of the nantes cryogenic testing station. Paris, France: Gaz de France, 2003.

Influence of liquefied natural gas composition and functional specifications of storages of launching equipment on rollover phenomenon time

02, February 2013

DOI: 10.7463/0213.0552136

Korolev N.S.

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

hocleric@rambler.ru

The urgency of liquefied natural gas applications as long-range rocket fuel is connected with better characteristics in comparison with rocket kerosene. However, if liquefied natural gas is stored in ground facilities it can be affected by the negative phenomenon called rollover. Studying causes of occurrence of this phenomenon is the primary design task for creating safe storage systems. In this article major factors influencing the start time of the rollover phenomenon are described. The results of the research can be used at designing fueling systems of spaceport ground facilities.

Publications with keywords: [rollover](#), [launching equipment](#), [rocket fuel](#), [liquefied natural gas](#), [storage systems](#)

Publications with words: [rollover](#), [launching equipment](#), [rocket fuel](#), [liquefied natural gas](#), [storage systems](#)

References

1. *Issledovanie voprosov proizvodstva i ispol'zovaniia SPG v kachestve al'ternativnogo topliva v razlichnykh otrasliakh narodnogo khoziaistva: otchet* [Study on the production and use of LNG as an alternative fuel in various sectors of economy. Report]. Moscow, MEI, «Krión», 1994. 125 p. Non published.
2. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Mamin V.V. Issledovaniia GKNPTs im. M. V. Khrunicheva po obosnovaniiu mnogorazovoi trebuemoi razmernosti raketno-kosmicheskoi sistemy [Research of the Khrunichev State space scientific-production center on the substantiation of reusable required dimensionality of space-rocket system]. *Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2010, no. 1, pp. 3-12.

3. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., et al. Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok pervoi stupeni mnogorazovoi raketno-kosmicheskoi sistemy [Justification of the choice of components of rocket fuel for propulsion of the first stage of reusable space-rocket systems]. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 1, pp. 19-55.
4. Korolev N.S. Matematicheskoe modelirovaniye iavleniya rollover v sistemakh khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza [Mathematical modeling of phenomena of rollover in the systems of storage of liquefied natural gas]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavтики: materialy 37 akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian astronautics: Materials 37th academic readings on Astronautics]. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 383-384.
5. Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyi prirodnyi gaz vchera, segodnya, zavtra* [Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 256 p.
6. Korolev N.S. Analiz vozniknoveniya iavleniya «rollover» v sistemakh khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza [Analysis of occurrence of the phenomenon "rollover" in storage systems of liquefied natural gas]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavтики: materialy 36 akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian astronautics: Materials 36th academic readings on Astronautics]. Moscow, RAS Commission Publ., 2012, pp. 353-354.
7. The European fuels conference 11th annual meeting. *Hydrocarbon world*. Paris, France, World Refining Association, 2010, vol. 4, iss. 2, pp. 35-38.
8. Korolev N.S. K postroeniyu matematicheskoi modeli iavleniya rollover v khranilishche SPG [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.edu.ru/doc/345773.html>, accessed 01.12.2012.
9. Chugunkov V.V. *Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii* [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 28 p.
10. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. *Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mIn storage tank of the nantes cryogenic testing station*. Paris, France, Gaz de France, 2003.