

УДК 629.7.082.6

Методика оценки пикового давления в газовой подушке хранилища сжиженного природного газа стартового комплекса при возникновении ролловера

Н.С. Королев, И.В. Бармин

При использовании сжиженного природного газа в ракетно-космической технике при его хранении существует возможность возникновения ролловера. По приведенной в статье методике можно оценить пиковое давление в момент возникновения ролловера, что позволит выбрать условия безопасного хранения сжиженного природного газа. В методике определены зависимости технологических параметров систем хранения и характеристик компонента для оценки пикового давления. Используя предложенную методику, можно учесть параметры ролловера при проектировании систем хранения горючего на стартовых комплексах космодромов.

Ключевые слова: стартовое оборудование, топливо ракетное, сжиженный природный газ, системы хранения.

Assessment Method for the peak pressure in a Gas Cushion of liquefied natural Gas Storage at Launch Complex if a Rollover

N.S. Korolev, I.V. Barmin

When using the liquefied natural gas in the rocket and space technology the possibility of a rollover during its storage exists. The article presents the assessment method for the peak pressure at a rollover start that allows choosing the terms of liquefied natural gas safe storage. According to the methodology to estimate the peak pressure the technological parameters of storage systems and component characteristics are defined.

The proposed method using allows considering the parameters of a rollover while designing the fuel storage systems at Spaceport Launch Complex.

Keywords: Launch Complex, rocket fuel, liquefied natural gas, storage systems.

Применение сжиженного природного газа (СПГ) в ракетно-космической технике обусловлено рядом преимуществ по сравнению с ракетным керосином: более высокая энергетика, меньшая стоимость самого компонента и более высокая чистота при сгорании с жидким кислородом [1–3]. В настоящее время СПГ рассматривают в качестве ракетного горючего для перспективных многоразовых ра-



КОРОЛЕВ
Николай Сергеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KOROLEV
Nikolay Sergeevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



БАРМИН
Игорь Владимирович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

BARMIN
Igor Vladimirovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

кетно-космических систем, разработку которых ведут передовые ракетно-космические предприятия страны [2, 3].

Однако при использовании СПГ в системах хранения на стартовом комплексе существует возможность протекания негативного явления, возникающего при дозаправке емкости хранилища новой дозой, физические параметры которой отличаются от имеющейся в хранилище. Данное явление, обусловленное возникновением через некоторое время резкого увеличения давления, получило название ролловер [4]. Физическая суть ролловера заключается в следующем. Вследствие разной плотности доз происходит стратификация СПГ на два горизонтальных слоя. Нижний слой за счет внешнего теплопритока перегревается и аккумулирует теплоту, не успевая передать ее верхнему слою. С течением времени плотности слоев выравниваются и происходит интенсивное перемешивание СПГ, а накопленная теплота затрачивается на фазовый переход части жидкости, тем самым увеличивая давление в газовой подушке. Возникающий интенсивный рост давления может привести к разрушению хранилища и заправочных магистралей, что, в свою очередь, может обусловить возникновение и развитие пожара на стартовом комплексе.

Пиковое давление в газовой подушке системы хранения можно определить из следующего выражения:

$$P_{\text{пик}} = P_{\text{г}} + \frac{\Delta m R_{\text{CH}_4} T}{V},$$

где $P_{\text{г}}$ — начальное давление в газовой подушке; Δm — масса испарившегося метана; R_{CH_4} — газовая постоянная метана; T — температура метана в газовой подушке; V — объем газовой подушки.

Для прогнозирования параметров и негативных последствий при возникновении ролловера проведено моделирование этого явления [5, 6] на основе численного решения системы уравнений термодинамики необратимых процессов с целью определения параметров воздействия на хранилище СПГ. Так как моделирование является трудоемким процессом [7] для использования в проектной практике хра-

нилищ СПГ на стартовых комплексах, необходимо описать параметры ролловера обобщенными зависимостями, полученными на основе обработки результатов численных расчетов по определению пикового давления для хранилищ с определенными геометрическими характеристиками.

Поскольку при проектировании хранилищ стремятся использовать унифицированные размеры, достаточно смоделировать явление для небольшого ряда объектов. Например, для наземной инфраструктуры ракетно-космических комплексов унифицированный ряд горизонтальных цилиндрических сосудов, применяемых в стартовом оборудовании, имеет следующие объемы: 50, 64, 100, 150, 200 м³.

По результатам численного моделирования параметров ролловера, результаты которого представлены на рис. 1—4, выявлено влияние на пиковое давление следующих характеристик [3]: термического сопротивления изоляции хранилища, его геометрии, концентрации компонентов макрослоев и степени заполнения хранилища порциями СПГ.

На основании анализа результатов моделирования ролловера [6] в хранилищах СПГ установлено, что выражения изменения пикового давления при его возникновении имеют вид, близ-

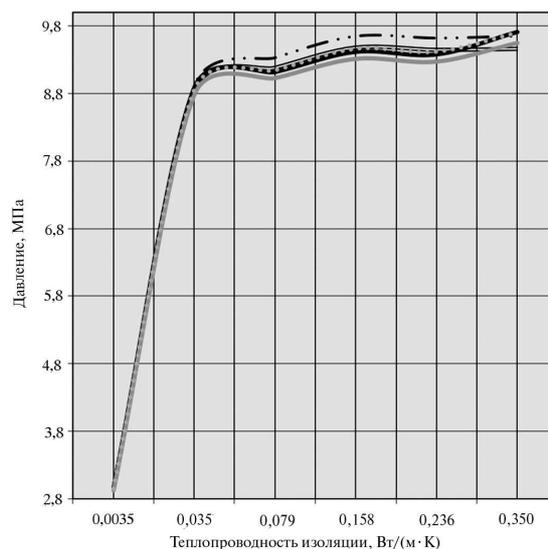


Рис. 1. Зависимость прогнозируемого изменения пикового давления в цилиндрических хранилищах СПГ при ролловере от теплопроводности изоляции:

— — 50 м³; — · — 64 м³; — — 100 м³; — — 150 м³;
· · · · — 200 м³

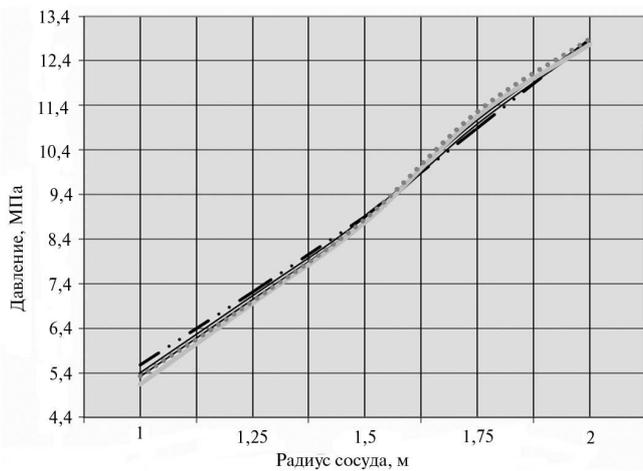


Рис. 2. Зависимость изменения пикового давления в хранилищах СПГ при роллвере от геометрических характеристик цилиндрических сосудов:

— — 50 м³; — · — 64 м³; = — 100 м³; — — 150 м³;
 · · · · — 200 м³

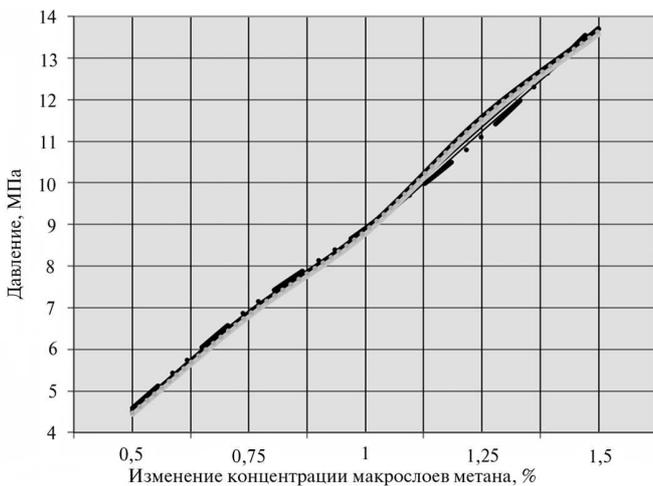


Рис. 3. Зависимость изменения пикового давления в хранилищах СПГ при роллвере от разности концентрации в макрослоях метана:

— — 50 м³; — · — 64 м³; = — 100 м³; — — 150 м³;
 · · · · — 200 м³

кий к линейным функциям от определяющих параметров, и слабо зависят от объема хранилищ, что позволяет сформулировать следующее выражение для оценки пикового давления:

$$P_{\text{пик}} = k_{\text{из}} k_{\text{Г}} k_{\text{кон}} k_{\text{выс}} P_{\text{эт}},$$

где $P_{\text{пик}}$ — пиковое давление в проектируемом хранилище; $k_{\text{из}}$ — коэффициент подобия изоляции; $k_{\text{Г}}$ — коэффициент подобия геометрии хранилища; $k_{\text{кон}}$ — коэффициент подобия начальных концентраций; $k_{\text{выс}}$ — коэффициент по-

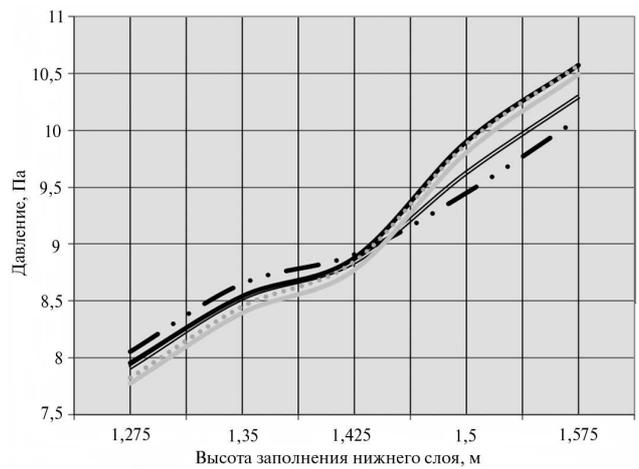


Рис. 4. Зависимость изменения пикового давления в хранилищах СПГ при роллвере от начального уровня заполнения хранилища:

— — 50 м³; — · — 64 м³; = — 100 м³; — — 150 м³;
 · · · · — 200 м³

добия высоты заполнения нижнего слоя; $P_{\text{эт}}$ — пиковое давление в эталонном хранилище.

В качестве иллюстрации использования полученного соотношения ниже приведены результаты обработки данных численных расчетов на примере эталонного хранилища СПГ объемом 100 м³.

Основные характеристики эталонного хранилища СПГ объемом 100 м³

Диаметр сосуда, мм	3 000
Толщина стенки сосуда, мм	12
Материал сосуда	12X18H10T
Коэффициент теплопроводности сосуда, Вт/(м·К)	13,4
Длина сосуда, мм	14 405
Диаметр кожуха, мм	3 500
Толщина стенки кожуха, мм	12
Материал кожуха	09Г2С
Коэффициент теплопроводности кожуха, Вт/(м·К)	12
Длина кожуха, мм	14 905
Давление в газовой подушке, КПа	0,6/ избыточное
Тип изоляции	Многослойный экрано-вакуумный
Толщина изоляции, мм	30
Коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К)	0,00315

Основные характеристики макрослоев СПГ эталонного хранилища объемом 100 м³

Нижний слой

Молярный состав, %:

N ₂	0,5
CH ₄	97,5
C ₂ H ₆	2,0
C ₃ H ₈ -C ₅ H ₁₂	—

Верхний слой

Молярный состав, %:

N ₂	0,5
CH ₄	98,5
C ₂ H ₆	1,0
C ₃ H ₈ -C ₅ H ₁₂	—

Высота верхней границы слоя, мм:

нижний слой	1 425
верхний слой	2 755

Температура кипения слоя, К:

нижний слой	110,91
верхний слой	110,78

Результаты расчетов показали, что для описанного выше хранилища пиковое давление составляет $P_{\text{пик}} = 2,96$ МПа, а коэффициенты, учитывающие влияние определяющих параметров на изменение пикового давления, могут быть найдены по следующим зависимостям:

$$k_{\text{из}} = 0,221 \frac{\delta_{\text{пр}} \lambda_{\text{эт}}}{\delta_{\text{эт}} \lambda_{\text{пр}}} + 0,7789 \text{ при } \frac{\delta_{\text{пр}} \lambda_{\text{эт}}}{\delta_{\text{эт}} \lambda_{\text{пр}}} \leq 10,$$

или

$$k_{\text{из}} = 0,0021 \frac{\delta_{\text{пр}} \lambda_{\text{эт}}}{\delta_{\text{эт}} \lambda_{\text{пр}}} + 2,969 \text{ при } \frac{\delta_{\text{пр}} \lambda_{\text{эт}}}{\delta_{\text{эт}} \lambda_{\text{пр}}} > 10,$$

где $\delta_{\text{эт}}$, $\delta_{\text{пр}}$ — эквивалентные толщины эталонной и проектируемой изоляций, $\lambda_{\text{эт}}$, $\lambda_{\text{пр}}$ — эквивалентные теплопроводности эталонной и проектируемой изоляций;

$$k_{\text{рад}} = 0,4595 \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{эт}}} + 0,5405,$$

где $R_{\text{эт}}$, $R_{\text{пр}}$ — радиусы эталонного и проектируемого сосуда;

$$k_{\text{кон}} = \frac{\Delta_{\text{CH}_{4\text{пр}}}}{\Delta_{\text{CH}_{4\text{эт}}}},$$

где $\Delta_{\text{CH}_{4\text{пр}}}$, $\Delta_{\text{CH}_{4\text{эт}}}$ — разности начальных концентраций метана макрослоев в проектируемом и эталонном хранилище СПГ;

$$k_{\text{выс}} = 1,3248 \frac{h_{\text{пр}}}{h_{\text{эт}}} - 0,3248,$$

где $h_{\text{пр}}$, $h_{\text{эт}}$ — высоты заполнения нижним слоем в проектируемом и эталонном хранилище СПГ.

Выражения для определения коэффициентов справедливы в диапазонах изменения относительных определяющих параметров:

$$1 \leq \frac{\delta_{\text{пр}} \lambda_{\text{эт}}}{\delta_{\text{эт}} \lambda_{\text{пр}}} \leq 100; 0,667 \leq \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{эт}}} \leq 1,333;$$

$$0,5 \leq \frac{\Delta_{\text{CH}_{4\text{пр}}}}{\Delta_{\text{CH}_{4\text{эт}}}} \leq 1,5; 0,895 \leq \frac{h_{\text{пр}}}{h_{\text{эт}}} \leq 1,105.$$

Погрешность вычисления оценочного значения пикового давления в газовой подушке по полученным зависимостям не превышает 10% значений, найденных численным методом. Это является приемлемым результатом и позволяет сделать вывод о возможности использования полученных соотношений при выполнении расчетов при проектировании хранилищ с целью снижения последствий или предотвращения ролловера, так и принятия возможных мер безопасности на стартовых комплексах при использовании в качестве горючего СПГ.

Литература

1. Кузин А.И., Лозин С.Н., Лехов П.А., Семенов А.И., Горбатенко В.В. Проектные исследования ГКНПЦ им. М.В. Хруничева по обоснованию многоразовой ракетно-космической системы // Авиакосмическая техника и технология. 2010. № 1. С. 3—12.
2. Кузин А.И., Рачук В.С., Коротеев А.С. Обоснование выбора компонентов ракетного топлива для двигательных установок первой ступени многоразовой ракетно-космиче-

ской системы // *Авиакосмическая техника и технология*. 2010. № 1. С. 19–55.

3. *Королев Н.С.* К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ [Электронный ресурс] / Н.С. Королев // *Наука и образование*. 2012. № 3. (Дата обращения 28.03.2012). <http://technomag.edu.ru/doc/345773.html>.

4. Safety Aspects of Liquefied natural Gas in the Marine Environment / NMAВ-354/ The National Research Council/ USA, Washington D.C., 1980.

5. *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.

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. *Bashiri A. A., Fatehnejad L.* Modeling and Simulation of Rollover in LNG Storage Tanks / Tehran, Iran, 2005.

References

1. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Gorbatenko V.V. *Proektnye issledovaniia GKNPTs im. M.V. Khrunicheva po obosnovaniiu mnogorazovoi raketno-kosmicheskoi sistemy* [Design studies Khrunichev State Research and Production Space Center to validate reusable rocket and space systems]. *Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia* [Aerospace Technology]. 2010, no. 1, pp. 3–12.

2. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S. *Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok*

pervoi stupeni mnogorazovoi raketno-kosmicheskoi sistemy [Rationale for the selection of components of rocket fuel for propulsion of the first stage reusable rocket and space systems]. *Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia* [Aerospace Technology]. 2010, no. 1, pp. 19–55.

3. Korolev N.S. K postroeniiu matematicheskoi modeli iavleniia rollover v khranilishche SPG [Mathematic rollover model in LNG storage tank]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/345773.html>.

4. *Safety Aspects of Liquefied natural Gas in the Marine Environment*. NMAВ-354. The National Research Council. USA, Washington D.C., 1980.

5. Korolev N.S. *Matematicheskoe modelirovanie iavleniia rollover v sistemakh khraneniia szhizhennogo prirodnogo gaza* [Mathematical modeling of rollover for more storage of liquefied natural gas]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: Materialy XXXVII akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of the Russian space: Materials XXXVII academic readings on space]. Moscow, Komissiiia RAN, 2013, pp. 383–384.

6. Korolev N.S. *Analiz vozniknoveniia iavleniia «rollover» v sistemakh khraneniia szhizhennogo prirodnogo gaza* [Analysis of the phenomenon of «rollover» for more storage of liquefied natural gas]. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: Materialy XXXVI akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of the Russian space: Articles XXXVI academic readings on space]. Moscow, Komissiiia RAN, 2012, pp. 353–354.

7. *Bashiri A.A., Fatehnejad L., Modeling and Simulation of Rollover in LNG Storage Tanks*. Tehran, Iran, 2005.

Статья поступила 22.03.2013

Информация об авторах

КОРОЛЕВ Николай Сергеевич (Москва) — аспирант кафедры «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: hocleric@rambler.ru).

БАРМИН Игорь Владимирович (Москва) — член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки Российской Федерации, президент академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, генеральный конструктор по наземной космической инфраструктуре ФГУП «ЦЭНКИ», зав. кафедрой «Стартовые ракетные комплексы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).

Information about the authors

KOROLEV Nikolay Sergeevich (Moscow) — Post-Graduate of «Launch Rocket Complexes» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: hocleric@rambler.ru).

BARMIN Igor Vladimirovich (Moscow) — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Worker of Science of Russian Federation, President of Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, General Designer for GCI, Deputy General Director of FSUE «TsENKI» Chairman of «Launch Rocket Complexes» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru).