

УДК 62-93; 97; 98

Аварийные режимы в криогенных неизотермических резервуарах для сжиженного природного газа

С.П. Горбачев^{1*}, Т.И. Клеблеев²

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

² АО «НПП Криосервис», Российская Федерация, 105043, г. Москва, Заводской пр-д, д. 23, помещение 1

* E-mail: S_Gorbachev@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова:

сжиженный природный газ, криогенный резервуар, аварийный режим, нарушение герметичности, разрывная мембрана.

Тезисы. При малотоннажном производстве и использовании сжиженного природного газа (СПГ) применяются криогенные неизотермические резервуары с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией. Для этих резервуаров возможна аварийная ситуация, когда нарушается герметичность внутреннего сосуда или трубопровода, жидкость выливается в межстенное (изоляционное) пространство, испаряется и давление повышается. Если межстенное пространство снабжено предохранительным устройством, то рост давления ограничен, но возможны заполнение межстенного пространства жидкостью и выброс части жидкости в окружающую среду, что может привести к загазованности территории. Если отказаться от предохранительного устройства, то значение давления в межстенном пространстве способно превысить давление во внутреннем сосуде и привести к разрушению внутреннего сосуда.

В работе предложена физико-математическая модель процесса изменения давления в межстенном пространстве при проливе СПГ и приведены результаты численного моделирования. В частности, показано, что разрушение внутреннего сосуда из-за внешнего давления наиболее вероятно при относительно малой площади течи.

В технологии малотоннажного производства и использования сжиженного природного газа (СПГ) для хранения и перевозки жидкости используются криогенные неизотермические резервуары с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией, полностью аналогичные емкостному оборудованию для жидкого кислорода, азота, аргона. Рабочее давление при хранении СПГ, как правило, равно 0,5...0,8 МПа (изб.).

Упрощенная технологическая схема резервуара представлена на рис. 1. На резервуарах имеются два предохранительных устройства: предохранительный клапан на внутреннем сосуде, открывающийся при превышении рабочего давления, и разрывная мембрана на наружном кожухе резервуара. Назначение мембраны – не допустить разрушения кожуха в случае повышения давления в межстенном пространстве, а также превышения давлением в межстенном (изоляционном) пространстве давления во внутреннем сосуде, поскольку это может привести к потере устойчивости оболочки внутреннего сосуда с последующим ее разрушением. Наиболее вероятная причина повышения давления в изоляционном пространстве резервуара – нарушение герметичности внутреннего сосуда или коммуникаций, заполненных жидкостью. В этом случае криогенная жидкость вытекает в замкнутое межстенное пространство, частично испаряется из-за теплообмена с изоляцией и стенкой кожуха, и давление в межстенном пространстве возрастает. Если его значение превысит атмосферное давление более чем на 0,005 МПа, мембрана разорвется, пары из межстенного пространства будут сбрасываться в атмосферу и давление в межстенном пространстве будет поддерживаться на уровне атмосферного давления. При этом, однако, если давление во внутреннем сосуде достаточно велико, то жидкость продолжит вытекать в межстенное пространство. Поскольку объем межстенного пространства, как правило, меньше объема внутреннего сосуда, то возможны переполнение межстенного пространства и выброс жидкости наружу. Если для жидкого азота и кислорода эта ситуация рассматривается как инцидент, то для СПГ пролив жидкости наружу приводит

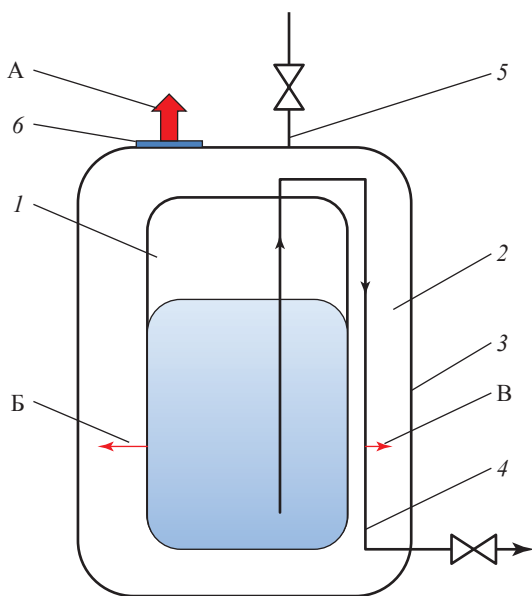


Рис. 1. Упрощенная газогидравлическая схема криогенного неизотермического резервуара: 1 – внутренний сосуд; 2 – межстенное пространство; 3 – наружный кожух; 4 – трубопровод слива-налива; 5 – трубопровод газосброса; 6 – разрывная мембрана кожуха; А – сброс газа из межстенного пространства через разрывную мембрану; Б – негерметичность в стенке внутреннего сосуда; В – негерметичность в сливо-наливном трубопроводе

к возникновению аварийной ситуации. В частности, исходя из возможных последствий этой ситуации принимаются меры противопожарной безопасности¹: обваловка под резервуаром, противопожарное орошение, противопожарные разрывы.

Увеличение объема межстенного пространства с целью исключить выброс жидкости наружу не является универсальным решением. Если жидкость во внутреннем сосуде находится в равновесном состоянии при давлении выше атмосферного, то при истечении жидкости в межстенное пространство происходит ее вскипание (парообразование при снижении давления), и объем образующейся парожидкостной смеси в несколько раз превышает объем жидкости, вытекающей из внутреннего сосуда в межстенное пространство. В итоге чтобы исключить выброс жидкости наружу,

необходимо, чтобы объем межстенного пространства в несколько раз превышал объем внутреннего сосуда.

Другой способ исключить выброс жидкости из резервуара наружу – отказаться от разрывной мембраны и допустить накопление жидкости в межстенном пространстве при негерметичности внутреннего сосуда или коммуникаций, допуская повышение давления в межстенном пространстве в результате испарения жидкости (такое решение используется, например, в резервуарах для транспортирования горючих жидкостей).

При этом предполагается, что если давление в межстенном пространстве за счет испарения жидкости превысит давление во внутреннем сосуде, то за счет обратного потока значения давлений в межстенном пространстве и во внутреннем сосуде выровняются и будут поддерживаться одинаковыми. Для реализации этого технического решения наружный кожух резервуара необходимо изготавливать из хладостойкой стали.

Цель данной статьи – оценить возможную величину превышения давлением в межстенном пространстве давления во внутреннем сосуде в переходном процессе и работоспособность предложенного технического решения. Рассмотрим наихудший случай, когда при нарушении герметичности из внутреннего сосуда или жидкостного трубопровода в межстенное пространство вытекает жидкость, а обратно из межстенного пространства во внутренний сосуд выходит пар.

Физико-математическую модель процесса можно представить следующим образом:

- *первый период.* В начальный момент времени ($\tau = 0$) открывается отверстие в стенке внутреннего сосуда, заполненного жидкостью, и начинается истечение жидкости в межстенное пространство. В межстенном пространстве жидкость частично испаряется из-за теплообмена со стенками наружного кожуха и тепловой изоляцией, а также из-за вскипания, обусловленного разностью между температурой жидкости во внутреннем сосуде и равновесной температурой жидкости в межстенном пространстве. Образовавшийся пар заполняет межстенное пространство, там же накапливается жидкость. В результате парообразования давление в замкнутом объеме увеличивается, и расход жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство уменьшается.

¹ См. СП 326.1311500.2017. Объекты малотоннажного производства и потребления СПГ. Требования пожарной безопасности.

Когда давления в межстенном пространстве и внутреннем сосуде сравниваются, истечение жидкости прекратится;

- *второй период.* Давление в межстенном пространстве продолжает увеличиваться из-за испарения жидкости, накопленной в первом периоде, и начинается истечение пара из межстенного пространства обратно во внутренний сосуд через то же отверстие. Если значение давления в межстенном пространстве превышает давление во внутреннем сосуде, то стенки сосуда начинают работать на устойчивость, и если перепад давлений превысит допустимое значение, произойдет разрушение внутреннего сосуда с выбросом жидкости в атмосферу. Таким образом, целью расчета аварийного режима в данном случае является оценка возможного превышения давления в межстенном пространстве по отношению к давлению во внутреннем сосуде.

При постановке задачи примем следующие основные допущения:

- во время переходного процесса изменятся только параметры пара в межстенном пространстве, параметры жидкости в сосуде остаются постоянными;

- во время переходного процесса объем жидкости в межстенном пространстве существенно меньше объема пара, т.е. объем пара не изменяется в переходном процессе и равен объему межстенного пространства;

- расход жидкости из сосуда в межстенное пространство и расход пара из межстенного пространства в сосуд рассматриваются как истечение через диафрагму;

- теплоприток из окружающей среды к объему пара не учитывается;

- пар рассматривается как идеальный газ.

Изменение давления (P) в открытой термодинамической системе (обмен с внешней средой энергией и массой) имеет вид [1]:

$$\frac{V}{\eta} \frac{dP}{dt} = \dot{Q} - \mu P \dot{V} + \sum_1^n (\mu P v - \Delta h_k) \dot{M}_k, \quad (1)$$

где $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ – теплоприток извне; $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ –

скорость изменения объема системы;

$\dot{M}_k = \frac{dM_k}{dt}$ – приток $\left(\frac{dM_k}{dt} > 0\right)$ либо отток $\left(\frac{dM_k}{dt} < 0\right)$ массы из системы; Δh_k – разность

энтальпий среды и входящего потока массы, v – удельный объем. Для идеального газа

$$\eta = k - 1; \quad \mu = \frac{k}{k-1}; \quad k = \frac{c_p}{c_v} - \text{коэффициент адиа-}$$

баты, где c_p и c_v – соответственно изобарная и изохорная теплоемкости идеального газа.

Используя эти зависимости, изменение давления в межстенном пространстве при истечении жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство (первый период) можно представить в виде:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{k-1}{V_2} \frac{k}{k-1} \frac{P_2(\tau)V_2}{M_n(\tau)} - c_n(T_{ж1} - T_{ж2})[G_{н1}(\tau) + G_{н2}(\tau)]; \quad (2)$$

$$\frac{dM_n}{dt} = \frac{G_{н1} + G_{н2}}{r}; \quad (3)$$

$$\frac{dT_{ст.п}}{dt} = \frac{\alpha F_{ст.п}(T_{ст.п} - T_{ж2})}{M_{ст.п} c_{ст.п}}; \quad (4)$$

$$G_{н1} = \frac{\alpha F_{ст.п} k_F (T_{ст.п} - T_{ж2})}{r}; \quad (5)$$

$$G_{н2} = \mu f \rho_{ж} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2(\tau))}{\rho_{ж}}} \frac{(T_{ж1} - T_{ж2}) c_{ж}}{r}; \quad (6)$$

$$M_{ж1} = \int_0^{\tau} \mu f \rho_{ж} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2(\tau))}{\rho_{ж}}} dt - M_n. \quad (7)$$

В этих формулах: P_1, P_2 – давления во внутреннем сосуде и межстенном пространстве резервуара соответственно; $T_{ж1}, T_{ж2}, T_{ст.п}$ – температуры жидкости во внутреннем сосуде, межстенном пространстве и температура стенки наружного кожуха соответственно; V_2 – объем межстенного пространства; $F_{ст.п}$ – площадь наружной поверхности резервуара; M_n – масса газа в межстенном пространстве резервуара; f – площадь негерметичности внутреннего сосуда; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости; $c_n, c_{ж}$ – теплоемкость пара и жидкости соответственно; r – теплота паробразования; α – коэффициент теплоотдачи от жидкости; k_F – коэффициент поверхности, учитывающий, какую часть поверхности резервуара омывает жидкость, накопившаяся в межстенном пространстве; μ – коэффициент истечения жидкости через диафрагму; $G_{н1}$ – расход пара, образующегося при испарении жидкости в межстенном пространстве; $G_{н2}$ – расход пара, образующегося при вскипании жидкости, поступающей в межстенное пространство;

$M_{ж1}$ – количество жидкости в межстенном пространстве во время первого периода; $M_{ст.р}$, $c_{ст.р}$ – масса стенки резервуара и теплоемкость металла.

Представленная математическая модель достаточно строго описывает переходный процесс повышения давления в межстенном пространстве при поступлении жидкости из внутреннего сосуда (первый период). Однако площадь поверхности, омываемой жидкостью, поступающей в межстенное пространство, неопределенна. В качестве допущения предлагается ввести в зависимость (5) коэффициент поверхности k_F , значение которого задается в диапазоне $0 \dots 1$ и пропорционально расходу жидкости через отверстие. В зависимость (4) этот коэффициент не вводится, поскольку отношение $F_{ст.р}/M_{ст.р}$ примерно постоянно.

Первый период заканчивается, когда давление в межстенном пространстве сравняется с давлением во внутреннем сосуде и истечение жидкости из внутреннего сосуда прекращается.

Как отмечалось ранее, во время второго периода происходит истечение пара из межстенного пространства обратно во внутренний сосуд. Математическая модель изменения давления в межстенном пространстве для второго периода отличается тем, что температура пара, выходящего из парового пространства межстенного пространства, равна температуре оставшегося пара и имеет место докритическое истечение газа из межстенного пространства

во внутренний сосуд через диафрагму. С учетом этих замечаний изменение давления в межстенном пространстве описывается следующим образом:

$$\frac{dP_2}{d\tau} = \frac{k-1}{V_2} \frac{k}{k-1} \frac{P_2 V_2}{M_n} (G_{п3} - G_{п4}); \quad (8)$$

$$\frac{dM_n}{d\tau} = \frac{G_{п3} - G_{п4}}{r}; \quad (9)$$

$$\frac{dT_{ст.р}}{d\tau} = \frac{\alpha F_{ст.р} (T_{ст.р} - T_{ж2})}{M_{ст.р} c_{ст.р}}; \quad (10)$$

$$G_{п3} = \frac{\alpha F_{ст.р} k_F (T_{ст.р} - T_{ж2})}{r}; \quad (11)$$

$$G_{п4} = \mu f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \sqrt{\frac{P_2}{v_{п2}}}; \quad (12)$$

$$M_{ж2} = M_{ж1} - M_n, \quad (13)$$

где $G_{п3}$ – расход пара, образующегося при испарении жидкости в межстенном пространстве; $G_{п4}$ – расход пара из межстенного пространства во внутренний сосуд через отверстие; $M_{ж2}$ – количество жидкости в межстенном пространстве; $v_{п2}$ – удельный объем пара в межстенном пространстве.

Представленная математическая модель позволяет оценить изменение давления в межстенном пространстве криогенного резервуара при возникновении негерметичности во внутреннем сосуде.

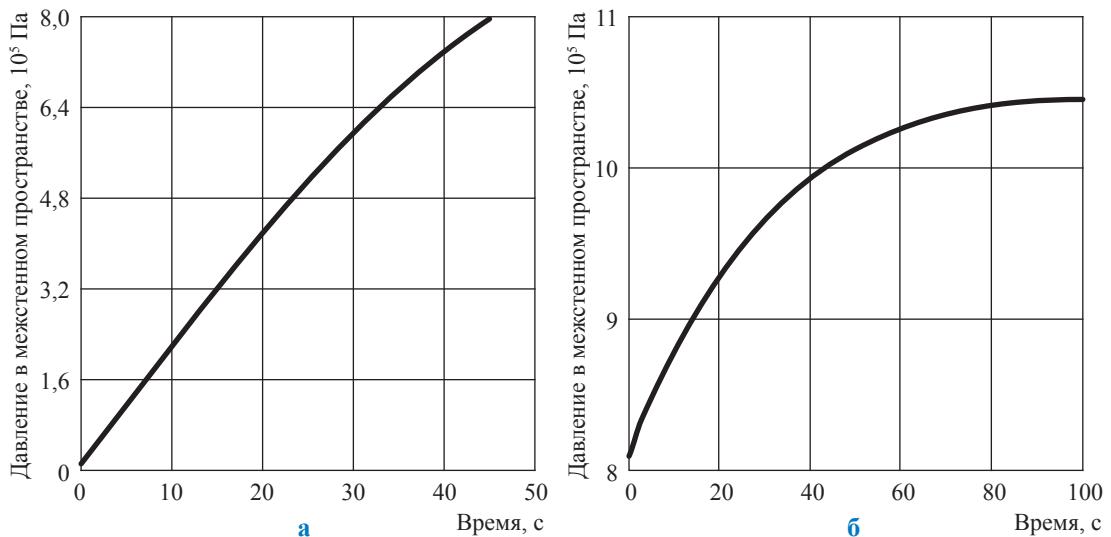


Рис. 2. Изменение давления в межстенном пространстве резервуара при разгерметизации внутреннего сосуда. Диаметр отверстия 0,015 м, $k_F = 1$: а – 1-й период; б – 2-й период

Ниже представлены результаты моделирования переходных процессов при возникновении негерметичности в межстенном пространстве вертикального криогенного резервуара. Параметры резервуара: рабочее давление 0,8 МПа (изб.), объем внутреннего сосуда 7,5 м³, объем межстенного пространства 3,5 м³, материал стенок – сталь X18H9T толщиной 8 мм. Внутренний сосуд заполнен жидким метаном в равновесном состоянии при давлении 0,8 МПа (температура 144 К). Как показывают расчеты, цилиндрический сосуд, рассчитанный на внутреннее давление 0,8 МПа, выдерживает внешнее давление 0,1 МПа. Поэтому в качестве допустимого перепада давлений между межстенным пространством и внутренним сосудом примем величину 0,1 МПа

Предполагается, что в межстенном пространстве резервуара труба диаметром 30 мм раскрылась на 25 % (условный диаметр отверстия 15 мм).

На рис. 2 показано, как изменяется давление в межстенном пространстве резервуара при истечении жидкости и пара через отверстие диаметром 15 мм при $k_F = 1$. На рис. 2а видно, что примерно через 45 с давление в межстенном пространстве возрастает с 0,01 до 0,8 МПа и сравнивается с давлением в сосуде, при этом количество жидкости составит около 35 кг. Первый период окончен, и начинается обратное истечение пара из межстенного пространства во внутренний сосуд через то же самое отверстие. Давление в межстенном пространстве за 40 с возрастает до 0,9 МПа (перепад

давлений 0,1 МПа), а через 100 с – до 1,05 МПа (перепад 0,25 МПа), т.е. перепад давлений превышает допустимое значение и возможно разрушение внутреннего сосуда из-за потери устойчивости (см. рис. 2б).

На рис. 3 представлены результаты расчетов переходного процесса в том же резервуаре, но площадь теплообмена жидкости в межстенном пространстве уменьшена в 2 раза ($k_F = 0,5$). Это означает, что скорость испарения жидкости в межстенном пространстве также уменьшилась в 2 раза. Длительность 1-го периода (время достижения давления 0,8 МПа) увеличилась до 100 с (см. рис. 3а), а количество жидкости, накопленной в межстенном пространстве в 1-м периоде, составит около 60 кг. Из-за низкой скорости испарения давление в межстенном пространстве во 2-м периоде практически не меняется и останется равным приблизительно 0,8 МПа, т.е. внутренний сосуд не разрушится (см. рис. 3б). Исходя из этого результата можно предположить, что ограничение поверхности теплообмена позволяет исключить потерю устойчивости внутреннего сосуда резервуара.

Однако это предположение не подтверждается, если рассматривать результаты расчета переходного процесса для отверстия диаметром 5 мм при $k_F = 0,2$. В этом случае давление в межстенном пространстве за 400 с возрастает до 0,8 МПа (рис. 4, см. а), а количество накопленной жидкости составит около 30 кг. Во 2-м периоде жидкость испаряется в течение 800 с. Давление 0,9 МПа достигается через

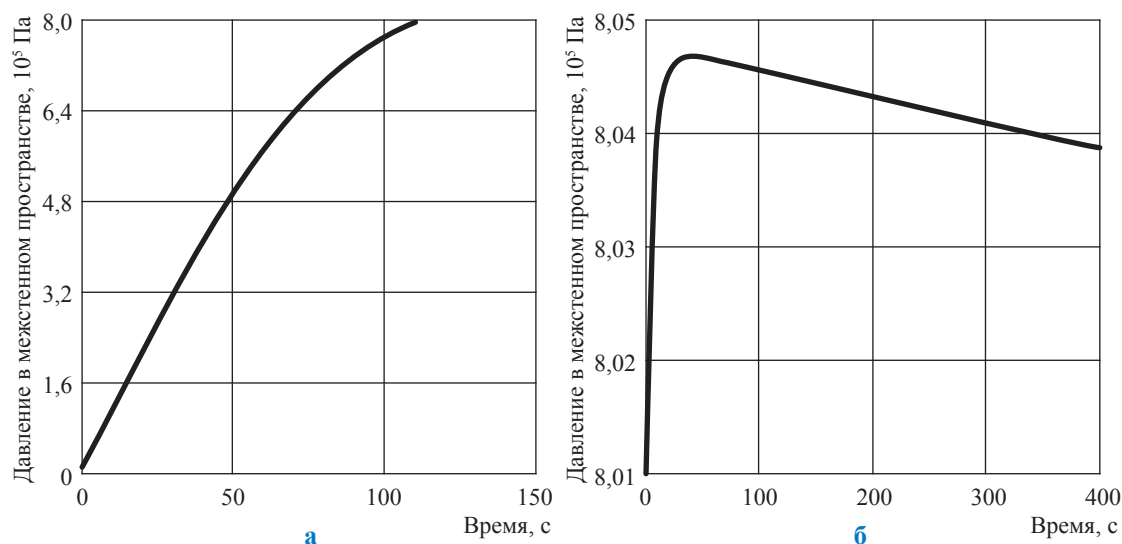


Рис. 3. Изменение давления в межстенном пространстве резервуара при разгерметизации внутреннего сосуда. Диаметр отверстия 0,015 м, $k_F = 0,5$: а – 1-й период; б – 2-й период

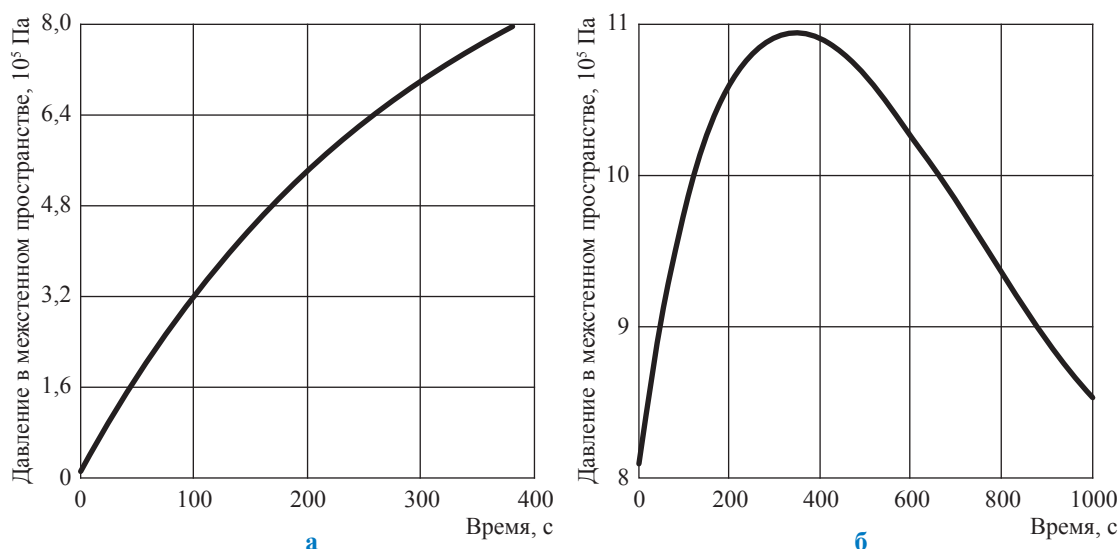


Рис. 4. Изменение давления в межстенном пространстве резервуара при разгерметизации внутреннего сосуда. Диаметр отверстия 0,005 м, $k_F = 0,2$: а – 1-й период; б – 2-й период

50 с, а через 380 с давление равно экстремальному значению 1,1 МПа, т.е. во время переходного процесса превышает допустимый перепад давлений и внутренний сосуд может разрушиться.

Таким образом, результаты расчетов показывают, что потеря устойчивости внутреннего сосуда возможна при любых размерах негерметичности и любых условиях теплообмена,

т.е. сброс жидкости в замкнутое межстенное пространство резервуара при нарушении герметичности внутреннего сосуда не исключает возможности разрушения внутреннего сосуда из-за потери устойчивости, и это решение не может быть рекомендовано для реализации.

Список литературы

1. Горбачев С.П. Теплофизические процессы в криогенных системах: учеб. пособие / С.П. Горбачев. – М.: МЭИ, 2017. – 108 с.

Emergency modes in cryogenic non-isothermal tanks for liquefied natural gas

S.P. Gorbachev^{1*}, T.I. Klebleyev²

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

² Cryoservice Research and Productive Enterprise JSC, Off. 1, Bld. 23, Zavodskoy proyezd, Moscow, 105043, Russian Federation

* E-mail: S_Gorbachev@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. In case of low-ton production and application of liquefied natural gas (LNG) the cryogenic tanks with vacuum-powder or vacuum-multi-layer insulation are used. For these tanks, an emergency situation is possible when the tightness of an internal vessel or a pipeline is broken, the liquid flows out into the inter-wall (isolation) space, evaporates, and pressure increases. If the inter-wall space is equipped with a safety device, the increase in pressure is limited, but it is possible to fill the inter-wall space with liquid, and release part of the liquid into the environment, which can lead to the increased concentration of methane in the air. If you abandon the safety device, the value of pressure in the inter-wall space can exceed the pressure in the inner vessel, which can lead to the destruction of the inner vessel.

This paper reveals a physical and a mathematical model of pressure metamorphosis in the inter-wall space in case of the LNG spillage, and the results of numerical modeling. In particular, it shows that the destruction of the inner vessel due to external pressure is most likely with a relatively small area of a leak.

Keywords: liquefied natural gas, cryogenic tank, emergency mode, depressurization, rapture plate.

References

1. GORBACHEV, S.P. *Thermophysical processes in cryogenic systems* [Теплофизические процессы в криогенных системах]: tutorial. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2017. (Russ.).