

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРАНСПОРТЕ И ХРАНЕНИИ  
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

УДК 622.691

**CALCULATION OF THERMAL AND HYDRAULIC PARAMETERS OF PROCESSES  
DURING LNG TRANSPORTATION AND STORAGE****В.О. Рахимов, Г.Е. Коробков**  
ФГБОУ ВПО Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет**V.O. Rakhimov, G.E. Korobkov**  
FSBEI Ufa state petroleum technical  
university

В статье предлагается методика расчёта радиуса аварийного разлива сжиженного природного газа (СПГ) из пробоины танкера-метановоза на водной поверхности. Учитывается мгновенное возгорание пролива как наиболее вероятное событие, а также предлагается метод расчёта характеристик сжиженного природного газа при его стратификации в резервуаре для хранения, времени наступления «ролловера» и количества мгновенно испаряющейся жидкости в момент «ролловера» при действии теплового потока от горения пролива. Методика учитывает зарубежный опыт анализа последствий при разливах СПГ и их горении, а также способы расчёта характеристик стратифицированной жидкости в изотермических резервуарах.

The purpose of this paper is to consider the method of calculation of the spill radius of LNG from the ship hole on water surface. The method takes into account the foreign experience of the analysis of the consequence LNG releases. This paper is also to consider the method of calculation of the liquefied natural gas properties when the stratification of it is observed in the LNG storage tank, the period before the «rollover» process, the amount of instant liquid vaporization and the influence of LNG pool fire on LNG storage tanks are described in this article.

*Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), радиус разлива, танкер-метановоз, плавучий «бассейн», фронт растекания, стратификация СПГ, «ролловер», тепловой режим, тепло- и массоперенос.*

*Key words: liquefied natural gas (LNG), spill radius, LNG carrier, floating pool, spill front edge, LNG stratification, «rollover», thermal regime, heat and mass transfer.*

Задача производства сжиженного природного газа (СПГ) приобретает всё большую значимость для России как перспективное направление переработки и транспортирования природного газа. Наиболее масштабное производство СПГ рассматривается для разработки шельфовых газовых и нефтяных месторождений Крайнего Севера и Дальнего Востока. При утилизации попутного нефтяного газа на промыслах, значительно удалённых от газотранспортной системы, или при ограничении доступа к ней также рассматривается возможность производства СПГ. Газификация значительной части малых населённых пунктов с использованием СПГ оценена как экономически более выгодная по сравнению с газопроводным способом транспортировки газа [1]. Кроме того, в течение многих лет продолжают программы по использованию СПГ в качестве моторного топлива на транспорте.

Сегодня в мире производство СПГ осуществляется на 27-ми крупнотоннажных заводах в 15 странах. В стадии строительства находятся ещё 6 заводов и более 20-ти проектируются. Для приёма СПГ и его

регазификации построено 68 терминалов; ведётся строительство 21 терминала, а ещё 40 — проектируются.

Перевозка СПГ осуществляется в основном морским путём. Доля морского транспорта СПГ составляет около 23% от общего объёма поставок газа в мировой торговле и продолжает расти. Обеспечивается это флотом танкеров-метановозов. На сегодняшний день мировой флот таких танкеров насчитывает более 350 судов общей вместимостью порядка 50 млн. м<sup>3</sup> [2].

В общем случае береговой комплекс СПГ включает в себя следующие объекты: резервуарный парк хранения СПГ, систему трубопроводов и специализированные причалы с установленным оборудованием для отгрузки сжиженного природного газа. При этом стоимость резервуарного парка составляет до 50 % стоимости всего комплекса. Соответственно, к этим сооружениям должны предъявляться особые требования как при строительстве, так и при эксплуатации [3].

Согласно документа [4] при проектировании терминалов СПГ необходимо рассматривать ситуацию, когда происходит нарушение герметичности одного танка танкера-метановоза с проливом содержимого на воду и с дальнейшим либо мгновенным воспламенением испаряющегося газа (пожар разлития), либо испарением пролитого на воду СПГ с формированием тяжелого взрывоопасного облака; при этом условная вероятность мгновенного воспламенения принимается равной 0,6, а условная вероятность формирования тяжелого облака — 0,4. Это важно для определения безопасных расстояний

между объектами и для определения возможных теплогидравлических режимов береговых резервуаров для хранения СПГ. Для этого определяются поражающие факторы, такие как величина теплового излучения и давления в ударной волне при дефлаграционном или детонационном сгорании газовоздушной смеси. Эти факторы определяются исходя из радиуса разлива по нормативным документам [5,6,7]. При этом отсутствуют рекомендации по определению такого радиуса, за исключением случая разлива в обвалование резервуара (здесь максимальным радиусом разлива будет размер обвалования). Но в случае истечения СПГ из танкера жидкость распространяется на неограниченной водной поверхности, образуя плавучий «бассейн». При его горении, выделяющееся тепло влияет на теплогидравлический режим хранилищ СПГ, в том числе при наличии в них стратифицированной по плотности криогенной жидкости, что может привести к «ролловеру». В данной работе предлагается метод расчёта характеристик растекающегося по водной поверхности СПГ, а также определение теплогидравлического режима расположенного на берегу резервуара для СПГ с учётом горения разлившегося на воде СПГ.

Поскольку истечение происходит на воду, то необходимо определить ускорение свободного падения с учётом выталкивающей силы:

$$g_{np} = g(\rho_{\text{воды}} - \rho_{\text{СПГ}}) / \rho_{\text{в}}, \text{ м/с}^2 \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $\rho_{\text{воды}}$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\rho_{\text{СПГ}}$  – плотность СПГ,  $\text{кг/м}^3$ .

Определяем среднюю толщину «бассейна»:

$$h = V/A, \text{ м} \quad (2)$$

где  $V$  – объём вытекшей жидкости,  $\text{м}^3$ ;  
 $A$  – площадь «бассейна»,  $\text{м}^2$ .

Так как площадь «бассейна» не известна, то его среднюю толщину можно принять равной 0,01 м. Следует отметить, что толщина во фронте разлива  $h_{\phi}$ , отличается от средней толщины «бассейна» и связаны они коэффициентом формы:

$$s = h_{\phi}/h. \quad (3)$$

Если  $s < 1$ , то «бассейн» имеет форму выпуклой линзы, если  $s > 1$ , то тогда его форма напоминает вогнутую линзу. По данным [8], при растекании СПГ по воде  $s > 1$  и рассчитывается по уравнению

$$s = u^2 / (Fr^2 \cdot g_{np} \cdot h), \quad (4)$$

где  $u$  – скорость распространения жидкости,  $\text{м/с}$ ;  
 $Fr$  – число Фруда. При растекании СПГ на водной поверхности  $Fr = 1,078$  [9].

В данном случае величина  $1/Fr^2$  представляет собой лобовое сопротивление растеканию. При  $s > 2$  следует понимать, что «бассейн» распался на отдельные сфероиды. При  $s < 2$  он является сплошным. Так как при  $s = 2$  растекающаяся жидкость

имеет переходную форму, то для удобства вводится параметр  $j$ , который определяется как

$$j = 1, \text{ при } s > 2; \quad (5)$$

$$j = 2/s \text{ при } s < 2. \quad (6)$$

Коэффициент формы зависит от нескольких факторов, значительно влияющих на толщину слоя во фронте разлива. Одним из них является поверхностное натяжение СПГ, и тогда толщина во фронте определяется по уравнению:

$$h_{\phi, \sigma} = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot \rho_{\text{СПГ}}}}, \text{ м} \quad (7)$$

где  $h_{\phi, \sigma}$  – толщина во фронте разлива с учётом поверхностного натяжения, м;

$\sigma$  – поверхностное натяжение СПГ,  $\text{Н/м}$ .

Другим фактором, определяющим  $h_{\phi}$  при истечении жидкости с конечным расходом, является вязкость СПГ, сдерживающая распространение «бассейна». В этом случае толщина слоя во фронте рассчитывается по формуле:

$$h_{\phi, \nu} = \left( \frac{6 \cdot \nu_{\text{СПГ}} \cdot q}{\rho_{\text{СПГ}} \cdot \pi \cdot g} \right)^{0.25}, \quad (8)$$

где  $h_{\phi, \nu}$  – толщина слоя во фронте с учётом вязкости СПГ, м;

$\nu_{\text{СПГ}}$  – кинематическая вязкость СПГ,  $\text{мм}^2/\text{с}$ ;

$q$  – расход СПГ через пробоину,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Ввиду того, что оба эти фактора действуют одновременно, то в расчётах следует принимать максимальную толщину во фронте распространения  $h_{\phi, \text{max}}$  из двух вышеуказанных.

Таким образом, считая, что поверхностное натяжение и вязкость СПГ являются сдерживающими факторами распространения «бассейна» и влияют на его форму, то тогда коэффициент формы  $s$  рассчитывается по формуле

$$s = \frac{u^2}{2 \cdot Fr^2 \cdot g_{np} \cdot h} + \sqrt{\left( \frac{u^2}{2 \cdot Fr^2 \cdot g_{np} \cdot h} \right)^2 + \left( \frac{h_{\phi, \text{max}}}{h} \right)^2}. \quad (9)$$

Радиус разлива определяется из уравнения, которое представляет собой равновесие сил инерции, гравитации и сопротивления растеканию и записывается в следующем виде [8]:

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = \Phi(s) \cdot \left( 4 \cdot g_{np} \cdot \frac{h}{r} \right) - C_c, \text{ м/с}^2 \quad (10)$$

где  $r$  – радиус разлива СПГ, м;

$\Phi(s)$  – безразмерный коэффициент, зависящий от формы «бассейна»;

$$\Phi(s) = 1 - s, \text{ если } s < 2, \quad (11)$$

$$\Phi(s) = -s^2/4, \text{ если } s > 2. \quad (12)$$

$C_c$  – вязкостное или турбулентное сопротивление растеканию,  $\text{м/с}^2$ .

Нужно отметить, если «бассейн» имеет форму выпуклой линзы ( $s < 1$ ), то гравитационная сила направлена наружу, если он в форме вогнутой линзы ( $s > 1$ ), то гравитационная сила направлена внутрь образовавшегося зеркала СПГ.

Сопrotивление растеканию зависит от режима течения СПГ по водной поверхности. В случае ламинарного течения сопротивление определяется по формуле

$$C_{с,л} = \beta(s) \cdot (C \cdot v_{спг} \cdot \frac{u}{h^2}) \cdot (1 - f), \text{ м/с}^2 \quad (13)$$

где  $C$  – безразмерный параметр, определяющий вертикальный профиль скорости, для СПГ на воде  $C = 0,66$  [9];

$\beta(s)$  – безразмерный параметр, определяющий горизонтальный профиль скорости растекания. Определяется по формуле:

$$\beta(s) = 2,53 \cdot j_2; \quad (14)$$

$f$  – параметр, определяющий движение воды под растекающимся зеркалом СПГ. Задан в неявном виде как корень уравнения

$$\frac{\mu_{спг}}{\mu_{воды}} \cdot \sqrt{\left(\frac{u \cdot h^2}{v_{воды} \cdot r}\right)} \cdot \frac{1}{j} \cdot f^{1,5} = 1 - f, \quad (15)$$

где  $\mu_{спг}$  и  $\mu_{воды}$  – динамические вязкости СПГ и воды соответственно, Па·с;

$v_{воды}$  – кинематическая вязкость воды, м<sup>2</sup>/с.

При турбулентном течении сопротивление растеканию определяется по формуле

$$C_{с,т} = \alpha(s) \cdot C_f \cdot \frac{u^2}{h}, \text{ м/с}^2 \quad (16)$$

где  $\alpha(s)$  – параметр радиального профиля зеркала СПГ, рассчитывается по формуле:

$$\alpha(s) = 4,49 \cdot j; \quad (17)$$

$C_f$  – коэффициент турбулентного трения. Для СПГ на воде  $C_f = 0,0015$ .

Зная максимальный радиус разлива СПГ в соответствие с документом [7] интенсивность теплового излучения при горении пролива вычисляется по формуле

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau_1, \quad (18)$$

где  $q$  – интенсивность теплового излучения, кВт/м<sup>2</sup>;

$E_f$  – среднеповерхностная плотность теплового излучения, кВт/м<sup>2</sup>;

$F_q$  – угловой коэффициент облучённости;

$\tau_1$  – коэффициент пропускания атмосферы.

В свою очередь угловой коэффициент облучённости равен

$$F_q = \sqrt{F_v^2 + F_H^2}, \quad (19)$$

где  $F_v$  – вертикальная составляющая;

$F_H$  – горизонтальная составляющая.

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{S} \cdot \arctg\left(\frac{h_1}{\sqrt{S^2 - 1}}\right) - \frac{h_1}{S} \left[ \arctg\left(\sqrt{\frac{S-1}{S+1}}\right) - \left\{ \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \arctg\left(\sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}}\right) \right\} \right] \right\}, \quad (20)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{(B - \frac{1}{S})}{\sqrt{B^2 - 1}} \cdot \arctg\left(\sqrt{\frac{(B+1) \cdot (S-1)}{(B-1) \cdot (S+1)}}\right) - \frac{(A - \frac{1}{S})}{\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \arctg\left(\sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}}\right) \right], \quad (21)$$

где  $A, B, S, h_1$  – безразмерные коэффициенты.

$$A = \frac{h_1^2 + S^2 + 1}{2 \cdot S}, \quad (22)$$

$$B = \frac{1 + S^2}{2 \cdot S}, \quad (23)$$

$$S = \frac{2 \cdot r}{d}, \quad (24)$$

$$h_1 = \frac{2 \cdot H}{d}, \quad (25)$$

где  $r$  – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м;

$d$  – эффективный диаметр пролива, м;

$H$  – высота пламени, м.

$$d = 2R, \quad (26)$$

где  $R$  – максимальный радиус пролива, м.

$$H = 42 \cdot d \cdot \left[ \frac{m_g}{\rho_B \cdot (g \cdot d)^{0,5}} \right]^{0,61}, \quad (27)$$

где  $m_g$  – средняя массовая скорость выгорания пролива, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент пропускания атмосферы вычисляется по формуле

$$\tau_1 = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (r - 0,5 \cdot d)]. \quad (28)$$

Так как предполагается, что в резервуаре два слоя стратифицированной жидкости, то уравнения теплового баланса для каждого слоя запишутся:

– для верхнего слоя (индекс «2»):

$$q_{ж2} \cdot F_{ж2} + q_{г2} \cdot F_{г2} + q_{л2} \cdot F_{л2} = m_2 \cdot H_v + C_p \cdot m_2 (T_{г}^{\max} - T_{ж2}); \quad (29)$$

– для нижнего слоя (индекс «1»):

$$q_{ж1} \cdot F_{ж1} + q_{л2} \cdot F_{л2} + q_{л1} \cdot F_{л1} = m_1 \cdot H_v + C_p \cdot m_1 (T_{г}^{\max} - T_{ж1}); \quad (30)$$

где  $q_{ж}$ ,  $q_{г}$  – плотность теплового потока через ограждающие конструкции стен и крыши резервуара, граничащие, соответственно, с жидкостью и газом, Вт/м<sup>2</sup>;

$F_{ж}$ ,  $F_{г}$  – площадь поверхности стен и крыши, находящейся в контакте, соответственно, с жидкостью и газом, м<sup>2</sup>;

$q_{\text{дн}}$  – плотность теплового потока через днище, Вт/м<sup>2</sup>;

$F_{\text{дн}}$  – площадь днища, м<sup>2</sup>;

$m$  – количество жидкости, испаряющейся в резервуаре в единицу времени в результате теплопритока из окружающей среды, кг/с;

$H_v$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$C_p$  – изобарная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К);

$T_{\text{г макс}}$  – температура газа на выходе из резервуара, К;

$T_{\text{ж}}$  – температура СПГ, К.

$q_{12}$  – перенос тепла между слоями со средними температурами  $T_1$  и  $T_2$ .

Для расчёта коэффициента теплоотдачи на границе слоёв используем зависимость Мак-Адамса для одиночной пластины, нагреваемой снизу

$$\alpha_m = 0,1243 \cdot \lambda \cdot \left( \frac{g \cdot \Delta \rho}{v^2 \cdot \rho} \right)^{1/3}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (31)$$

Ввиду того, что формула (31) получена для воздуха, предполагается, что число Прандтля заметного влияния на процесс не оказывает. Принимается также, что обмен теплом и массой на поверхности раздела между слоями осуществляется через две конвективные турбулентные плёнки (через пограничные слои), в пределах которых происходит линейное изменение температуры и плотности. Исходя из этого следует, что коэффициенты теплоотдачи на границе раздела между слоем 1 и слоем 2 связаны как [10]

$$\alpha_{1m} = \alpha_2 = \left( \frac{1}{2} \right)^{4/3} \cdot \alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (32)$$

Перенос тепла между слоями  $q_{12}$  определяется как

$$q_{12} = k_{12} \cdot (T_1 - T_2), \text{ Вт}/\text{м}^2 \quad (33)$$

где  $k_{12}$  – коэффициент теплопередачи между слоями, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В свою очередь  $k_{12}$  определяется по уравнению [11]

$$k_{12} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 2,47 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda \cdot \left( \frac{g \cdot \Delta \rho}{v^2 \cdot \rho} \right)^{1/3}. \quad (34)$$

Однако в работе [12] в качестве числового коэффициента в формуле (34) рекомендуется для СПГ использовать величину  $5,53 \cdot 10^{-2}$ . Поэтому в нашей методике будем пользоваться данным значением.

В качестве механизма массопереноса принимаем эквивалентную противодиффузию, а также, что коэффициенты тепло- и массопереноса равнозначны и увязываются по аналогии Рейнольдса

$$\frac{k_{12}}{C_{p,i} \cdot \beta_{12}} = 1, \quad (35)$$

где  $C_{p,i}$  – изобарная теплоёмкость  $i$ -го компонента в СПГ, Дж/(кг·К).

После тепломассопереноса новое значение плотности в слоях определяется по уравнению [13]

$$\rho_{\text{спг1,2}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^N (X_i \cdot \bar{V}_i) - \bar{V}_m}, \quad (36)$$

где  $\rho_{\text{спг1,2}}$  – плотность СПГ при заданной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$X_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента;

$M_i$  – молекулярная масса  $i$ -го компонента, кг/кмоль;

$\bar{V}_i$  – мольный объём  $i$ -го компонента при заданной температуре, м<sup>3</sup>/кмоль;

$\bar{V}_m$  – молярный объём метана [13], м<sup>3</sup>/кмоль.

Для СПГ, имеющего молекулярную массу  $M < 33$  и содержание менее 5 процентов азота или изопарфинов,  $\bar{V}_m$  определяется по соотношению

$$\bar{V}_m = X_m \cdot C, \quad (37)$$

где  $X_m$  – мольная доля метана в СПГ;

$C$  – поправка, зависящая от молекулярной массы СПГ и его температуры, м<sup>3</sup>/кмоль.

Поскольку из нижнего слоя тепло отводится только посредством теплопереноса в верхний, соответственно в нём происходит аккумуляция тепла, что отражается в уменьшении его плотности. Ввиду того, что изменение массы в нижнем слое происходит за счёт массообмена с верхним, соответственно величина  $m_1$  является массой, которая освободится из нижнего слоя в момент «роллвера», тем самым превысив номинальное испарение в стационарном режиме.

Разработанная методика была реализована на компьютере с учётом времени истечения и распространения 12500 м<sup>3</sup> СПГ (половина объёма одной типичной ёмкости танкера-метановоза) на водной поверхности. Принималось, что происходит возгорание пролива. Расстояние до береговых резервуаров 800 м. Было получено, что максимальный радиус зеркала СПГ в данном случае составит 74 м и время полного выгорания равно 33 минутам (рисунок 1).

Резкий переход на кривой объясняется тем, что изменение радиуса разлива по закону (10) происходит до тех пор, пока профиль горизонтальной скорости  $u > 0$ . Сокращение радиуса, на графике это падение кривой, зависит только от скорости испарения (горения) поступившего в «бассейн» СПГ.

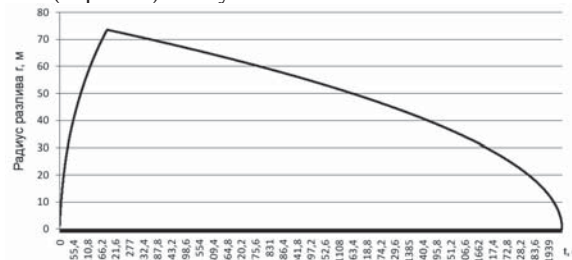


Рисунок 1. График зависимости радиуса разлива от времени истечения СПГ

Для оценки адекватности данной методики необходимо отметить, что результаты расчётов для аналогичных условий, проведённых на некоммерческом программном продукте, разработанном исследовательской группой ABSG для Американской Федеральной Энергетической Регулирующей Комиссии (FERC), следующие [14]: максимальный радиус разлива 70 м, время полного испарения зеркала 52 минуты, что практически совпадают с результатами разработанной нами методики определения радиуса разлива СПГ.

Далее определили величину теплового излучения при горении пролива СПГ на расстоянии 800 м равную  $73 \text{ кВт/м}^2$  (рисунок 2). При действии такого теплового излучения на рассматриваемый резервуар со стратифицированным СПГ время наступления возможного «ролловера» сокращается с 32 часов до 13 (рисунок 3). Соответственно меры по предупреждению массового выхода паров из резервуара должны быть приняты гораздо раньше.

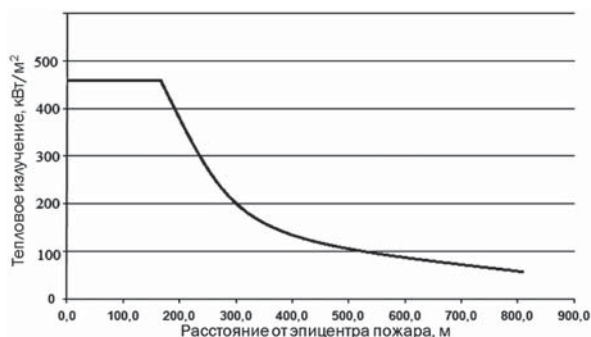


Рисунок 2. Изменение интенсивности теплового излучения при горении пролива СПГ

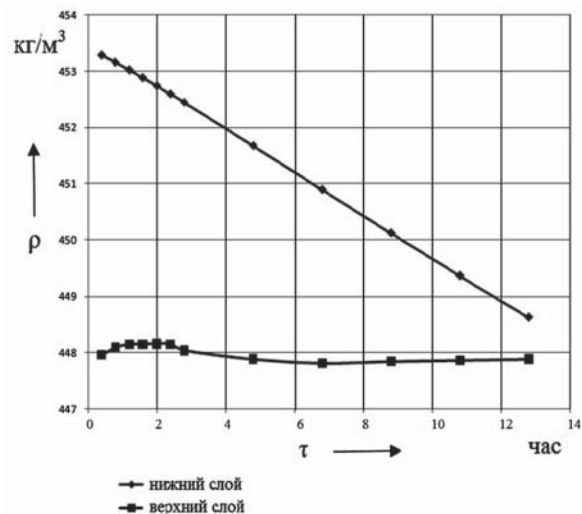


Рисунок 3. Зависимость плотности слоев от времени «инкубационного периода» перед «ролловером»

Ввиду того, что Россия стала страной экспортёром СПГ, а также планируется развивать эту отрасль в нашей стране, то задача создания нормативно-технической базы требует своего решения. Предложенная методика может быть использована при проектировании терминалов и резервуаров СПГ, а именно при расчётах безопасного расстояния от причальных сооружений до резервуаров хранения СПГ, пропускной способности предохранительных и сбросных устройств, а также при планировании работы средств предотвращения «ролловера».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Широкова Г.С., Елистратов М.В. Технологические задачи комплексной очистки природного газа для получения СПГ // Газовая промышленность. 2011. №8. С.11-15.
2. Воробьев А.М. Мировой флот танкеров СПГ в условиях современного рынка природного газа // Газовая промышленность. 2011. №8. С.41-43.
3. Интернет-ресурсы: <http://lngas.ru/life-safety-lng/problemy-termodinamika-spg.html>.
4. СТО Газпром 2-2.3-569-2011. Методическое руководство по расчёту и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировки сжиженного и сжатого природного газа. – Введ. 2011-05-26. М.: ОАО «Газпром», 2011. 102 с.
5. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – Взамен НПБ 105-95, 105-97. – Введ. 2003-08-01. М.: МЧС РФ, 2003. 28 с.
6. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы

- контроля – Введ. 2000-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2000. 93 с.
7. Свод правил СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – Введ. 2009-05-01. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. 28 с.
8. Consequence assessment methods for the incidents involving releases from liquefied natural gas carriers. / ABS Consulting Inc. for the Federal Energy Regulatory Commission under contract number FERC04C40196. USA.: FERC, 2004. P. 58.
9. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) / C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings. The Netherlands.: TNO, 2005. P.870.
10. Производство, хранение и транспорт сжиженного природного газа /. Шаммазов А.М. и др. СПб.: Недра, 2007. 152 с.
11. Сафонов В.С. Физические особенности и способы предотвращения стратификации СПГ в изотермических резервуарах. М., 1989. 34 с.– (Обз. информ. Сер. «Транспорт и подземное хранение газа» / ВНИИЭгазпром; Вып. 7).

12. Heestand, J. and C.W. Shipman, "A Predictive Model for Rollover in Stratified LNG Tanks", Aiche Journal. March 1983. Vol. 29, No.2. P.199
13. Пирогов С.Ю., Акулов Л.А., Ведерников М.В. Природный газ. Метан. СПб.: НПО "Профессионал", 2006. 848 с.
14. David W. Johnson, John B. Cornwell Modeling the release, spreading and burning of LNG, LPG and gasoline on water// Journal of Hazardous Materials 140 (2007) P. 535-540.

*Рахимов В.О., аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВПО УГНТУ  
Rakhimov V.O., postgraduate student of chair «Transportation and storage of oil and gas», FSBEI USPTU  
e-mail: Rakhimov\_VO@mail.ru*

*Коробков Г.Е., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВПО УГНТУ  
Korobkov G.E., dr.tech.sci., professor of chair «Transportation and storage of oil and gas», FSBEI USPTU*