Для цитирования: Хураמיшина Р.А., Ямалов А.И. Влияние состава сжиженного природного газа и технологических характеристик хранилищ стартового оборудования на время наступления явления ролловера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1):66-78. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

For citation: Khuramshina R.A., Yamalov A.I. The impact of liquefied natural gas composition and technological characteristics of the starting storage of the equipment at the time of occurrence of the phenomenon of rollover. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46(1):66-78.(In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.7.036

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-1-66-78

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХРАНИЛИЩ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВРЕМЯ НАСТУПЛЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ РОЛЛОВЕРА

Хураמיшина Р.А.², Ямалов А.И.¹

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, г.Уфа, ул.Космонавтов 1,Россия,

¹e-mail: azatyamalov@mail.ru, ²e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru,

Резюме. Цель. Способы предотвращения наступления ролловера в хранилище сжиженного природного газа. **Метод.** В статье рассматриваются современные методы математического моделирования и программного обеспечения при решении задач в нелинейной постановке. Проведен нормативный анализ существующих методов транспортировки СПГ. **Результат.** С помощью математической программы ANSYS смоделирован процесс ролловера в хранилище сжиженного природного газа. В программном комплексе ANSYS было произведено 3d моделирование процесса тепло и массообмена стратифицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа. При моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,7 %. По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от концентрации компонентных слоев, от заполнения и геометрии резервуара. Эти факторы приводят к увеличению испарения сжиженного природного газа 0,04 %. **Вывод.** Метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам. Применение программного комплекса ANSYS вычислительной гидрогазодинамики при процессе тепло и массообмена стратифицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа необходима при расчете повышенной точности.

Ключевые слова: математическая модель, сжиженный природный газ, программный комплекс ANSYS, газодинамика, процесс тепло и массообмена, стратифицированная жидкость, хранилище сжиженного природного газа, ролловер, двухтопливные двигатели

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

THE IMPACT OF LIQUEFIED NATURAL GAS COMPOSITION AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE STARTING STORAGE OF THE EQUIPMENT AT THE TIME OF OCCURRENCE OF THE PHENOMENON OF ROLLOVER

Regina A. Khuramshina², Azat I. Yamalov¹

Ufa State Petroleum Technological University,

1 Kosmonavtov Str., Ufa 450062, Russia,

¹e-mail: azatyamalov@mail.ru, ²e-mail: Khuramshina.regina@mail.ru

Abstract Objectives Ways to prevent the onset of rollover in the liquefied natural gas storage.

Method. The article deals with modern methods of mathematical modeling and software when solving problems in a nonlinear formulation. A regulatory analysis of existing methods of LNG transportation has been carried out. **Result.** Using the mathematical program ANSYS, the rollover process in the liquefied natural gas storage was modeled. In the ANSYS software package, 3d modeling of the process of heat and mass transfer of the stratified liquid in the liquefied natural gas storage was performed. When simulating a rollover phenomenon, the time to its occurrence was 30 minutes, which differs from the experimental value by 1.7%. Based on the results of the calculations, it can be determined that the time to the onset of rollover depends on the concentration of the component layers, on the filling and geometry of the reservoir. These factors lead to an increase in evaporation of liquefied natural gas of 0.04%. **Conclusion.** The method of numerical experiment allows to determine the distribution of pressure, temperature, density, concentration in the object under study, without resorting to real experiments. The use of the ANSYS software package of computational fluid dynamics in the process of heat and mass transfer of the stratified liquid in the liquefied natural gas storage is necessary when calculating the increased accuracy.

Keywords: mathematical model, liquefied natural gas, ANSYS program complex, gas dynamics, heat and mass transfer process, stratified liquid, liquefied natural gas storage, rollover, dual-fuel engines

Введение Природный газ является сегодня и останется на обозримую перспективу жизненно важным компонентом в обеспечении глобальных потребностей из-за своих преимуществ перед другими видами ископаемого топлива и в силу постоянной растущей в нем потребности. Большая часть газа доставляется потребителям по трубопроводам в газообразной форме. В некоторых случаях транспортировка сжиженного природного газа в танкерах предпочтительнее, чем другие способы доставки. Использование СПГ потребует существенного обновления судов, работающих в Арктике. Но это в любом случае придется делать, учитывая значительный возраст арктического флота России. СПГ позволит снизить риск разливов судового остаточного топлива, уменьшить выбросы в воздух загрязняющих веществ. Активные действия в этой области позволят усилить позиции российских производителей на быстро развивающемся мировом рынке СПГ топлива, продолжить освоение самых современных технологий мирового судостроения.

Переход на использование СПГ в качестве бункерного топлива позволит решить еще одну важнейшую экологическую проблему – аварийных разливов судового топлива, особенно при наличии ледового покрова. При использовании СПГ в системах хранения на стартовом комплексе существует возможность протекания негативного явления, получившего название «ролlover», 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. 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.

На изменение кондиционности СПГ могут влиять: расслоение СПГ в емкостях хранилища в результате периодического пополнения их, в том числе при обратном сливе из баков потребителя продуктом, имеющим иную плотность и состав по сравнению с остатком СПГ в резервуарах; попадание примесей из газов подготовки к заправке емкостей хранилища, заправочных трубопроводов и баков потребителя; попадание примесей из газов наддува баков потребителя.

Одним из важных факторов опасности СПГ являются его низкая температура кипения, 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 макро слоев СПГ в хранилище [3,4]. При последующем протекании тепло- и массообменных процессов в слоях СПГ возможно возникновение режима интенсивного перемешивания (явление «ролловер») с практически мгновенным испарением больших масс СПГ и резким повышением давления в хранилище. Все это способствует и разрушению хранилища и интенсификации неблагоприятных технологических процессов [5]. Схематическая картина механизмов ролловера указанного явления кратко проиллюстрирована на рис. 1.

Рис. 1. Перемешивание слоев при закачке продукта в резервуар с процессами тепло- и массообмена

Fig. 1. Mixing of layers during the injection of the product into the tank with the processes of heat and mass transfer

Заметим, что физическая модель процесса отличается тем, что при загрузке резервуара свойства продукта, уже хранящегося в изотермическом резервуаре (ИР), отличаются от свойств СПГ, закачиваемого в резервуар. В ИР, оборудованных системой нижнего налива, СПГ, имеющий большую плотность, образует нижний слой. СПГ, имеющий меньшую плотность, формирует верхний слой, который располагается над поверхностью нижнего, не перемешиваясь с ним. Перегреваясь относительно температуры насыщения за счет внешнего теплопритока через днище и стенки, продукт в нижнем слое при этом не имеет возможности компенсировать теплоприток за счет испарения, т.к. поверхность теплообмена закрыта нижним слоем. Однако имеют место процессы тепло- и массообмена двух слоев между собой и верхнего слоя с парогазовой фазой. В конечном итоге, в определенный момент времени после загрузки и образования стратификации, за счет описанных выше процессов плотности слоев выравниваются с последующей резкой интенсификацией процессов испарения продукта (суть явления ролловер). Математическое моделирование явления ролловера целесообразно проводить на базе уравнений математической физики, характеризующих взаимосвязанные нелинейные процессы пере-

носа теплоты, массы и импульса. В частности, моделирование тепловой части задачи будем проводить с использованием уравнения энергии в энтальпийной форме.

Постановка задачи. Имеется сферический резервуар, объемом 100000 м³. Резервуар наполовину заполнен сжиженным природным газом, который представляет собой многокомпонентное рабочее тело, находящееся в жидком агрегатном состоянии. После закачки в резервуар дополнительного объема СПГ он становится заполнен полностью. При этом в начальный момент времени можно выделить два слоя СПГ: нижний слой и верхний слой. Рабочее тело в этих слоях отличается компонентным составом, а также давлением и температурой. Параметры рабочего тела в верхнем и нижнем слое представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры компонентов рабочего тела
Table 1. Parameters of the working body components

Компонента (растворенного вещества) Component (solute)	Количество молей вещества Moles of substance	
	Нижний слой Bottom layer	Верхний слой Top layer
Метан Methane	0,6226	0,6362
Этан Ethane	0,2185	0,2416
Пропан+примеси Propane + impurities	0,1589	0,1222
Начальные свойства СПГ LNG Initial Properties		
Т, К	118,997	114,355
Р, МПа	0,15	0,131
ρ, кг/м ³	541,0316	536,9516

Требуется смоделировать явление ролловера, происходящее в резервуаре в течение 30 минут.

Методы исследования. Физические свойства всех компонент рабочего тела задавались в соответствии с данными работы [6]. Принималось, что все теплофизические свойства компонент постоянны, что допустимо при условии небольших перепадов температуры внутри расчетной области. Физические свойства всех компонент приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физические свойства компонентов рабочего тела
Table 2. Physical properties of the components of the working fluid

Химическая компонента Chemical component	Плотность, кг/м ³ Density, kg / m ³	Удельная теплоемкость, Дж/кгК Specific heat, j / kg·K	Удельная теплопроводность, Вт/мК Heat conductivity, W / m·K	Вязкость, кг / м·с Viscosity, kg / m·s	Молярная масса, кг/моль Molar mass, kg / mol
CH ₄	415,2	5477	0,6	2,1	16,043
C ₂ H ₆	561,0	2990	0,6	87,8	30,070
C ₃ H ₈ +примеси+impurities	493,1	2230	0,6	0,01	44,090

При определении осреднённых свойств гомогенного потока в контрольном объёме V, ограниченном замкнутой поверхностью A, система уравнений механики сплошной среды записывалась в интегральной декартовой форме в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV, \quad (1)$$

где вектора W, F и G определяются следующим образом

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v + p j \\ \rho w + p k \\ \rho E + p v \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Вектор H содержит источники члены.

где ρ, v, E, p – плотность, скорость, полная энергия на единицу массы и давление среды в контрольном объеме;

τ – тензор вязких напряжений;

q – плотность теплового потока.

Полная энергия E связана с полной энтальпией H следующим соотношением

$$E = H - p / \rho, \quad (3)$$

$$\text{где } H = h + |v|^2 / 2. \quad (4)$$

Для каждого из компонентов многокомпонентного рабочего тела решалось отдельное уравнение переноса массы в виде

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i C_i) + \nabla \cdot (\rho_i \vec{g}_i) = -\nabla \cdot \vec{g}_i + \omega_i, \quad (5)$$

где C_i – локальная массовая концентрация i -го компонента;

$\vec{g}_i$ – диффузионный поток i -го компонента;

ω_i – скорость образования i -го компонента в химических реакциях.

В уравнении (5) члены слева направо учитывают: нестационарность процесса переноса массы вещества, перенос массы вещества за счет конвекции, перенос массы вещества диффузией, источник массы вещества, обусловленный наличием химических реакций. Последний член в правой части уравнения (5) принимался равным нулю.

Диффузионный поток массы $\vec{g}_i$ вычислялся по закону Фика. Для моделирования диффузии массы выражение для диффузионного потока может быть записано в следующем виде (для турбулентных потоков)

$$\vec{g}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}, \quad (6)$$

где $D_{i,m}$ – коэффициент ламинарной диффузии массы для i -го компонента;

μ_t – турбулентная вязкость;

Sc_i – турбулентное число Шмидта;

Y_i – массовая концентрация i -го компонента;

$D_{T,i}$ – коэффициент термической диффузии (коэффициент Соре);

T – статическая температура.

В данной математической модели коэффициент $D_{i,m}$, который представляет собой коэффициент ламинарной диффузии массы для каждого i -го компонента, был заменен на один бинарный коэффициент D .

Такой подход гарантирует то, что сумма диффузионных потоков будет равна нулю. Значение коэффициента D вычислялось в предположении, что число Льюиса равно единице.

$$D = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (7)$$

где k – удельная теплопроводность смеси;

ρ – плотность смеси;

c_p – удельная теплоёмкость смеси.

Турбулентное число Шмидта записывается следующим образом:

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}, \quad (8)$$

где D_t – коэффициент турбулентной диффузии массы;

ρ – плотность смеси.

В рамках данной работы рассматриваются течения с большими числами Рейнольдса. По этой причине с целью моделирования турбулентных эффектов вышеописанная математическая модель была дополнена гибридной моделью турбулентности TransitionSST, которая показывает достаточно достоверные результаты для большинства задач, связанных с естественной конвекцией.

Модель турбулентности TransitionSST представляет собой гибридную модель, которая была получена путем модификации модели турбулентности SSTk- ω . Известно [6], что модель турбулентности SSTk- ω основана на осреднении по Рейнольдсу и относится к классу моделей вихревой вязкости. Она решает два уравнения переноса скалярной величины: одно для турбулентной кинетической энергии k и одно для частоты турбулентных пульсаций ω .

Модель турбулентности TransitionSST была получена путем дополнения модели SSTk- ω , ещё двумя уравнениями: одно уравнение для перемещаемости и одно для критерия начала перехода в членах числа Рейнольдса по толщине потери импульса. Эмпирические коэффициенты модели турбулентности были подобраны таким образом, чтобы обеспечить достоверные результаты во всем диапазоне чисел Рейнольдса, особенно при моделировании обтекания тел потоками газа с низкой начальной турбулизацией.

Уравнение переноса для перемещаемости γ имеет следующий вид

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right]. \quad (9)$$

Переходные источниковые члены в уравнении (9) имеют следующий вид

$$P_{\gamma 1} = C_{a1} F_{length} \rho S [\gamma F_{onset}]^{c_{\gamma 3}}; \quad (10)$$

$$E_{\gamma 1} = C_{e1} P_{\gamma 1} \gamma, \quad (11)$$

где S – величина сдвиговых напряжений;

F_{length} – эмпирическая функция, отвечающая за длину переходной области течения: $C_{a1} = 2,0$; $C_{e1} = 1,0$ – эмпирические константы.

Уравнение переноса для переходного числа Рейнольдса по толщине потери импульса $Re_{\theta t}$ имеет следующий вид

$$\frac{\partial(\rho Re_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j Re_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial Re_{\theta t}}{\partial x_j} \right]. \quad (12)$$

Присутствующие в уравнении (22) эмпирические константы имеют следующие значения

$$c_{\theta t} = 0.03, \quad \sigma_{\theta t} = 2.0. \quad (13)$$

Выбор эмпирических функций для переменных $Re_{\theta t}$, F_{length} и $Re_{\theta c}$ подробно описывается в работе [7]. Известно, для того чтобы решить дискретные аналоги уравнений Навье-Стокса и всех дополнительных моделей необходимо задать граничные условия, которые определяют поведение всех уравнений на границах расчётной области.

В рамках данной работы сферическая расчётная область ограничивалась поверхностью, представляющей собой твердую стенку для которой задавались следующие параметры: для уравнений количества движения – условие прилипания (принималось, что на поверхности нормальная и касательная компоненты вектора скорости потока равны нулю ($u_x = 0$, $u_y = 0$, $u_z = 0$)); для уравнения энергии – условие адиабатичности (данное условие является граничным условием второго рода; предполагается, что тепловые потоки в стенку равны нулю, теплообмен

между пространством резервуара и окружающей средой отсутствует; для уравнений переноса химических компонентов концентрации всех компонентов на поверхности определялись путем интерполяции из ячеек вверх по потоку.

Обсуждение результатов. Для решения поставленной задачи была построена неструктурированная расчетная сетка размерностью 830000 ячеек, которая показана на рис. 2. Для достоверного моделирования градиентов физических величин в пограничном слое на поверхности твердой стенки резервуара был построен слой из призматических ячеек толщиной в 6 ячеек.

а – общий вид; б – призматический слой увеличен

Рис. 2. Расчетная сетка (сечение по плоскости OXY)

a - general view; b - prism layer enlarged

Fig. 2. Calculated grid (section along the OXY plane)

Выбор начального приближения может оказать значительное влияние на устойчивость расчета, а также на скорость его сходимости. Неправильный выбор может вызвать неустойчивость расчёта, особенно в начальный момент итерационного процесса. Это в свою очередь будет требовать проведения итерационного процесса с меньшими значениями критерия Куранта – Фридрихса – Леви. Что выразится, в конечном счете, в большем потребном числе итераций и, следовательно, в увеличении необходимых расчётных ресурсов. В рамках данной работы предполагалось, что заполнение резервуара происходит много быстрее, чем время протекания ролловера. В связи с этим в качестве начального приближения принималось такое состояние, в котором параметры рабочего тела внутри резервуара соответствуют параметрам в табл. 1. То есть имеется нижний слой и верхний слой. Концентрация всех компонентов в нижнем и верхнем слое в начальный момент времени показана на рис. 3.

а – концентрация CH_4 ; б – концентрация C_2H_6 ; в – концентрация C_3H_8 + примеси

Рис. 3 Мольные концентрации всех химических компонент в начальный момент времени

a - concentration of CH_4 ; b — C_2H_6 concentration; в - concentration of C_3H_8 + impurity

Fig. 3 Mole concentrations of all chemical components at the initial moment of time

В ходе расчетов были получены все нестационарные распределения компонент рабочего тела внутри резервуара, а также нестационарные поля всех физических величин

На рис. 4 – 6 приведено поле векторов скорости в плоскости сечения OXY в моменты времени. Приведены поля мольных концентраций всех компонент в плоскости сечения OXY в моменты времени

Рис. 4. Поле векторов скорости в момент времени 180 с

Fig. 4. Field of velocity vectors at time instant 180 s

Рис.5. Поле векторов скорости в момент времени 720 с
 Fig.5. The field of velocity vectors at the moment of time 720 s

а – концентрация CH_4 ; б – концентрация C_2H_6 ; в – концентрация C_3H_8 включая примеси
 Рис. 6. Молярные концентрации всех химических компонент
 a - concentration $[\text{CH}_4]$; b - concentration C_2H_6 ; c - concentration C_3H_8 including impurities

Fig. 6. The molar concentrations of all chemical components

Результаты моделирования распределение скорости, температуры, плотности и молярных концентраций в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени представлены на рис.7 – 12.

Рис.7. Распределение скорости в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.7. The distribution of speed in the upper and lower layers, depending from time

Рис.8. Распределение температуры в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.8. Temperature distribution in the upper and lower layers depending on time

Рис.9. Распределение плотности в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.9. Density distribution in the upper and lower layer depending on time

Рис.10. Распределение мольной концентрации CH_4 в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.10. The distribution of the molar concentration of CH_4 in the upper and lower layers depending on time

Рис.11. Распределение мольной концентрации C_2H_6 в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.11. The distribution of the molar concentration of C_2H_6 in the upper and lower layers depending on time

Рис.12. Распределение мольной концентрации C_3H_8 в верхнем и нижнем слое в зависимости от времени
 Fig.12. The distribution of the molar concentration of C_3H_8 in the upper and lower layer depending on time

По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от состава сжиженного природного газа, от заполнения и геометрии резервуара. Проведено численное моделирование процессов перемешивания СПГ в резервуаре объемом 100000 м^3 . Дискретизованные по методу конечного объема уравнения газодинамики решались на трехмерной неструктурированной расчетной сетке.

При численном моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,3 %. Остальные расчетные характеристики по сравнению с экспериментальными данными имеют следующие погрешности: температура верхнего слоя - 1 %; температура нижнего слоя - 0,4 %; плотность верхнего слоя - 0,7 %; плотность нижнего слоя - 0,7 %; разница плотностей слоев - 2,7 %. По результатам вы-

полненных расчетов выявлено, что время до наступления явления зависит от состава СПГ, а так же степени заполнения, характеристик изоляции и геометрии хранилища.

Вывод. 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, 25]. Можно сделать следующий вывод: метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам.

Меры по предотвращению ролловера: партии СПГ с различной плотностью, хранить отдельно; загрузка резервуара специальным оборудованием, таким, как насадки способствующие смешиванию; СПГ при загрузке (используется для береговых резервуаров); следует избегать продолжительных остановок подачи СПГ при загрузке резервуара; постоянно контролировать уровень испарения СПГ.

Как было отмечено выше, причина явления переворачивания слоев - недостаточное смешивание поступающей в резервуар партии продукта с уже находящейся в нем жидкостью. Однако стратификация с дальнейшим вскипанием может также произойти при выдерживании СПГ в течение длительного времени в резервуаре без рециркуляции или при содержании азота в составе СПГ более 1 % (такая пороговая концентрация установлена по данным международных исследований явления rollover).

Для предотвращения стратификации резервуар оснащается системой рециркуляции с использованием насосов, а налив продукта должен быть организован предпочтительно таким образом, чтобы более тяжелый продукт образовывал верхний слой и смешение фаз, происходило за счет естественной гравитации. Поэтому конструкция резервуара должна предусматривать системы верхнего и нижнего налива, а также средства контроля плотности и температуры на разных уровнях. Кроме того, как правило, предусматривается многоуровневая защита резервуара от превышения внутреннего избыточного давления газовой фазы, обеспечивающая сброс газа в атмосферу или на факел [8]. Чтобы предсказать параметры, при которых может произойти явление ролловера, предложено провести математическое моделирование процесса. Математическое моделирование явления ролловера предполагает использование уравнений математической физики, характеризующих процессы переноса теплоты, массы и импульса в рамках термодинамики необратимых процессов.

В программном комплексе ANSYS было произведено 3d моделирование процесса тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа. При моделировании явления ролловера время до его наступления составило 30 минут, что отличается от экспериментального значения на 1,7 %. По результатам проведенных расчетов можно определить, что время до наступления ролловера зависит от концентрации компонентных слоев, от заполнения и геометрии резервуара. Эти факторы приводят к увеличению испарения сжиженного природного газа 0,04 %.

Метод численного эксперимента позволяет определить распределение давления, температуры, плотности, концентрации в исследуемом объекте, не прибегая к реальным экспериментам. Применение программного комплекса ANSYS вычислительной гидрогазодинамики при процессе тепло и массообмена страфицированной жидкости в хранилище сжиженного природного газа необходимо при расчете повышенной точности.

Библиографический список:

1. Перспективы использования СПГ в Арктическом регионе РФ по оценкам WWF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146> (дата обращения: 25.04.2018).
2. Власов А.В. Придет ли природный газ на смену мазуту? – Новые технологии. - Выпуск 4 (10). - 2010. - с. 67-70

3. Королев Н.С. К построению математической модели явления ролловер в хранилище СПГ // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон.журн. 2012. № 3.
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. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.
6. Варгафтик Н.Б., Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // М. Наука. 1972.
7. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.pplications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
8. Васильев, Г. Г. Особенности обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных изотермических резервуаров для хранения сжиженного природного газа / Г. Г. Васильев, С. Г. Иванцова, А. И. Рахманин // Газовая промышленность. – Выпуск: 11 11. – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013 – С. 57-61.
9. Рахимов В.О. Особенности термодинамических процессов при хранении сжиженного природного газа: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. кандидата техн. наук: 25.00.19/ Рахимов Вадим Олегович –М., –2013, –24 с.
10. Шаммазов А.М. Производство, хранение и транспорт сжиженного природного газа/ А.М. Шаммазов, Р.К. Тергулов, Б.Н.Мастобаев, Г.Е. Коробков. –СПб.: Недра, 2007. –152 с.
11. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018)
12. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018).
13. De Wit, Johannes. Liquefied Gas Storage Tank Design, Construction Addressed/ Johannes de Wit// Oil & Gas Journal. –1987. – 6 July
14. 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.
15. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications //AIAA Journal.August 1994.№ 32(8).pp. 1598–1605.
16. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.pplications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
17. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines. Rome, Italy: Publ. House “Ionta”, 2010. 263p.
18. 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, «Krion», 1994. 125 p. Non published
19. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Mamin V.V. Issledovaniia GKNPTs im. M. V. Khrunicheva po obosnovaniu 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 tekhnologiiia, 2010, no. 1, pp. 3-12.
20. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., et al. Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok pervoi stupeni mnogorazovoi raketnokosmicheskoi sistemy [Justification of the choice of components of rocket fuel for propulsion of the first stage of reusable space-rocket systems]. Aviakosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiiia , 2010, no. 1, pp. 19-55.
21. Korolev N.S. Matematicheskoe modelirovanie iavleniia rollover v sistemakh khraneniia 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 kosmonavтике [Actual problems of Russian astronautics: Materials 37th academic readings on Astronautics]. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 383-384.
22. 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.
23. Chugunkov V.V. Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruktssii [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 28 p.
24. The European fuels conference 11th annual meeting // HYDROCARBON WORLD. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. С. 35-38.
25. Бармин И.В., Кулис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / Под ред. А.М. Архарова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.

References:

1. Perspektivy ispol'zovaniya SPG v Arkticheskom regione RF po otsenkam WWF [Elektron-nyy resurs]. – Rezhim dostupa:[http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146\(data obrashcheniya: 25.04.2018\)](http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146(data obrashcheniya: 25.04.2018)). [Prospects of LNG use in the Arctic region of the Russian Federation according to WWF [Electronic resource]. – Mode of access:[http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146\(date accessed: 25.04.2018\)](http://proarctic.ru/04/07/2017/ecology/27146(date accessed: 25.04.2018)). (In Russ)]
2. Vlasov A.V. Pridet li prirodnyy gaz na smenu mazutu? - Novyyetekhnologii. - Vypusk 4 (10). - 2010. - s. 67-70 [Vlasov A. V. will the natural gas to replace fuel oil? - New technology. - Issue 4 (10). - 2010. - p. 67-70(In Russ)]
3. Korolev N.S. K postroyeniyu matematicheskoy modeli yavleniya rollover v khranilishche SPG // Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron.zhurn. 2012. № 3. [Queens N. S. To the construction of a mathematical model of the rollover phenomenon in LNG storage // Science and education. MGTU im. N. Uh. Bauman. Electron.journal. 2012. No. 3. (In Russ)]
4. Korolev N.S. Matematicheskoye modelirovaniye yavleniya rollover v sistemakh khraneniya szhi-zhennogo prirodnogo gaza // Aktual'nyye problemy rossiyskoy kosmonavтики: materialy XXXVII akademi-cheskikh chteniy po kosmonavтиke. M.: Komissiya RAN, 2013. C. 383-384. [Queens N. S. Mathematical modeling of the rollover phenomenon in liquefied natural gas storage systems // Actual problems of Russian cosmonautics: materials of XXXVII academic readings on cosmonautics. M.: Commission of RAS, 2013. 383-384. (In Russ)]
5. May E.F. Fluid Science for improved LNG Production and shipping. Presentation of the University Of Western Australia, 2010.
6. Vargaftik N.B., Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey // M. Nauka. 1972. [Vargaftik N. B. Reference book on thermophysical properties of gases and liquids // M. Nauka. 1972. (In Russ)]
7. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.ppllications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
8. Vasil'yev, G. G. Osobennosti obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii krupnogabaritnykh izo-termicheskikh rezervuarov dlya khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza / G. G. Vasil'yev, S. G. Ivantsova, A. I. Rakhmanin // Gazovaya promyshlennost'. – Vypusk: 11 11. – Moskva: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2013 – S. 57-61. [Vasil'ev, G. G. Features ensure the safe operation of large insulated storage tanks for liquefied natural gas / G. G. Vasilyev, S. G. Ivantsov, A. I. Rachmaninov // Gas industry. - Issue: 11 11. – Moscow: Russian state University of oil and gas. I. M. Gubkina, 2013-P. 57-61. (In Russ)]
9. Rakhimov V.O. Osobennosti termodinamicheskikh protsessov pri khraneni szhizhennogo prirodnogo gaza: avtoref. diss. na soisk. uch. step. kandidata tekh. nauk: 25.00.19/ Rakhimov Vadim Olegovich –M., –2013, –24 s. [Rakhimov V. O. features of thermodynamic processes during storage of liquefied natural gas: autoref. dis. on competition of a scientific degree. academic step. the candidate tehn. Sciences: 25.00.19 / Rakhimov Vadim Olegovich-M., –2013, –24 p. (In Russ)]
10. Shammazov A.M. Proizvodstvo, khraneniye i transport szhizhennogo prirodnogo gaza/ A.M. Shammazov, R.K. Teregulov, B.N.Mastobayev, G.Ye. Korobkov. –SPb.: Nedra, 2007. –152 s. [Shammazov A. M. Production, storage and transport of liquefied natural gas/ by A. M. Shammazov, R. K. Teregulov, B. N. Mastobayev, G. E. Box. –SPb.: Nedra, 2007. -152 p.vvv(In Russ)]
11. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018)
12. Liquefied Natural Gas Worldwide [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> (дата обращения: 25.04.2018).
13. De Wit, Johannes. Liquefied Gas Storage Tank Design, Construction Addressed/ Johannes de Wit// Oil & Gas Journal. –1987. – 6 July
14. Korolev N.S. Analiz vozniknoveniya yavleniya «rollover» v sistemakh khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza // Aktual'nyye problemy rossiyskoy kosmonavтики: Materialy XXXVI akademicheskikh chteniy po kosmonavтиke. M.:Komissiya RAN, 2012. C. 353–354. [Korolev N. S. Analysis of the occurrence of the "rollover" phenomenon in liquefied natural gas storage systems // Actual problems of Russian cosmonautics: materials of XXXVI academic readings on cosmonautics. M.: Commission of RAS, 2012. C. 353-354(In Russ)]
15. MenterF. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering AApplications //AIAA Journal.August 1994.№ 32(8).pp. 1598–1605.
16. Menter F. R., Langtry R. B., Likki S. R., Suzen Y. B., Huang P. G., Volker S.«A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation».(ASME-GT2004-53452),2004.ppllications //AIAA Journal.August 1994. №32 (8).pp. 1598–1605.
17. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines. Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. 263p.
18. Issledovanie voprosov proizvodstva i ispol'zovaniia SPG v kachestve al'ternativnogo topliva v razlichnykh ot-rasliakh narodnogo khoziaistva: otchet [Study on the production and use of LNG as an alternative fuel in various sectors of economy. Report]. Moscow, MEI, «Krypton», 1994. 125 p. Non published(In Russ)]

19. Kuzin A.I., Lozin S.N., Lekhov P.A., Semenov A.I., Mamin V.V. Issledovaniia GKNPTs im. M. V. Khrunicheva po obosnovaniu 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]. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 1, pp. 3-12.
20. Kuzin A.I., Rachuk V.S., Koroteev A.S., et al. Obosnovanie vybora komponentov raketnogo topliva dlia dvigatel'nykh ustanovok pervoi stupeni mnogorazovoi raketnokosmicheskoi 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. (In Russ)]
21. Korolev N.S. Matematicheskoe modelirovanie iavleniya rollover v sistemakh khraneniia 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. (In Russ)]
22. Uznanski D., Château E., Gorieu O., Legrandais J.-P. Investigations into the aging extent of the 9% nickel 500 mln storage tank of the nantes cryogenic testing station. Paris, France, Gaz de France, 2003.
23. Chugunkov V.V. Teploperedacha pri slozhnom teploobmene na poverkhnostiakh konstruksii [Heat transfer in complex heat transfer on surfaces of structures]. Moscow, Bauman 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. (In Russ)]
24. The European fuels conference 11th annual meeting // HYDROCARBON WORLD. Paris, France: World Refining Association, 2010. Vol. 4, iss. 2. C. 35-38.
25. Barmin I.V., Kunis I.D. Szhizhenny prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra / Pod red. A.M. Arkharova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2009. 256 s. [Barmin I. V., Kunis I. D. Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow / ed. by A. M. Arkharov. M.: Izd-vo MGTU im. N. Eh. Bauman, 2009. 256 p. (In Russ)]

Сведения об авторах.

Хурамшина Регина Азатовна – магистрант.

Ямалов Азат Ильфатович – инженер второй категории.

Information about the authors.

Regina A. Khuramshina – Master Student.

Azat I.Yamalov– Second category Engineer

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.12.2018.

Принята в печать 23. 01.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.12.2018.

Accepted for publication 23. 01.2019.