
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 51-74:621.6

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ БЕЗДРЕНАЖНОГО ХРАНЕНИЯ КРИОПРОДУКТОВ В СТАЦИОНАРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СОСУДАХ

COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR PREDICTING THE TIME OF NON-DRAIN CRYOPRODUCTS STORAGE IN STATIONARY AND TRANSPORT VESSELS

Е.С. Солдатов
E.S. Soldatov

Акционерное общество «Линде Газ Рус»,
Россия, 143900, Московская обл., Балашиха, ул. Беякова, 1а

Joint-stock company "Linde Gas Rus", 1a Belyakova St, Balashikha, Moscow Region, 143900, Russia

E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru

Аннотация

В статье представлен разработанный автором вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криогенных жидкостей в стационарных и транспортных криогенных емкостях, обеспечивающий возможность адекватного учета характеристик режимов эксплуатации криогенного оборудования, переменной температуры окружающей среды и технического состояния экранно-вакуумной теплоизоляции емкостей для долговременного хранения криогенных жидкостей. Эффективность разработанного алгоритма обеспечена проведенной верификацией с использованием базы данных результатов компьютерного моделирования теплообменных процессов в программном комплексе конечно-элементного анализа. Сформулированы рекомендации по использованию алгоритма для априорного определения начальной степени заполнения жидкостью криогенных контейнеров мультимодального типа.

Abstract

This article presents a computational algorithm for predicting the time of non-drainage storage of cryogenic liquids, which operates within the framework of the system for computational modeling of heat and mass transfer processes in stationary and transport cryogenic tanks. The main advantages of using the considered algorithm are the possibilities of taking into account the changing of different operation modes for cryogenic equipment, variable ambient temperature, as well as the technical condition of the screen-vacuum superinsulation, commonly used for long-term storage tanks. The effectiveness of the considered algorithm is provided by using a pre-formed database of computational modeling results of heat and mass transfer processes, obtained from the software of the finite element analysis. Practical recommendations are given for effective application the computational software complex during the choosing of initial filling-degree of cryogenic tanks with liquid, especially for multimodal-type tank-container.

Ключевые слова: вычислительный алгоритм, компьютерное моделирование тепломассообмена, бездренажное хранение, прогнозирование времени хранения, криопродукт, криогенная жидкость, сжиженный природный газ.

Keywords: computational algorithm, computational modeling of heat and mass transfer, non-drainage storage, holding time prediction, cryogenic liquid, liquefied natural gas.

Введение

В настоящее время исследователи по всему миру работают над созданием универсальных математических моделей, наиболее подробно описывающих физические процессы при длительном хранении криогенных жидкостей. К сожалению, учет многих факторов при долговременном хранении в транспортных и стационарных емкостях, например, колебаний сосуда при движении различными видами транспорта, значительно усложняет модель и требует в процессе расчета значительных затрат вычислительных ресурсов при использовании стандартных ЭВМ, и суперкомпьютеров. Особенно актуальным на сегодня является рассмотрение поставленного вопроса применительно к средствам хранения и транспортировки водорода, сжиженного природного газа (СПГ) и этилена. Также актуальными являются вопросы развития и внедрения в промышленности систем дистанционного мониторинга состояния криогенных сосудов, работающих под давлением, в том числе, используемых для хранения горючих газов.

В большинстве систем дистанционного мониторинга состояния емкостей, применяемых сегодня в промышленности, расчет уровня жидкости производится по данным от датчиков давления в паровой и жидкостной фазах сосуда. Это позволяет осуществлять удаленный контроль количества криопродукта в емкости, что дает неоценимую помощь при планировании потребления и поставок. Предметом отдельного исследования является моделирование транспортных процессов с учетом внедрения методов и алгоритмов компьютерного моделирования технологических процессов при хранении [Peric et al., 2009; Lisowski, Czyzycki, 2011; Маторин и др., 2015; Рудаков, Богомолов, 2013].

Имея данные о давлении и уровне в емкости, можно также рассчитывать планируемое время хранения в резервуаре или цистерне, которое ограничено из-за наличия теплопритока через изоляцию. Этот вопрос особенно актуален при низкой степени наполнения сосуда (менее 30 %), когда давление в газовой подушке растет достаточно быстро. Рост давления в резервуаре при малой степени отбора жидкого продукта может со временем привести к потерям газа из-за сброса через предохранительные клапана, а в случае с хранением горючих криопродуктов (СПГ, этилен) создать взрывопожароопасную ситуацию.

В статье представлен альтернативный подход к расчету времени бездренажного хранения, заключающийся в применении системы компьютерного моделирования процессов при долговременном хранении, а также вычислительного алгоритма прогнозирования. В результате реализации разработанного вычислительного алгоритма становится возможным учет как стационарных, так и транспортных режимов хранения криогенных продуктов. Прогноз также корректируется с учетом изменения температуры окружающей среды, а также учитывается техническое состояние теплоизоляции криогенной емкости. Возможность учитывать также потерю со временем вакуума в сосуде позволит более точно рассчитывать продолжительность процесса теплообмена вплоть до момента срабатывания предохранительных устройств на сосуде.

Основные подходы к определению времени бездренажного хранения для стационарных и транспортных криогенных емкостей

Ключевым параметром, оказывающим непосредственное влияние на продолжительность хранения криогенных жидкостей без потерь в атмосферу, является величина теплопритока к продукту через изоляцию (для малотоннажных сосудов обычно измеряется в Вт), в общем случае определяемая по формуле [Архаров, 1999]:

$$Q_{\text{эвти}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\delta_{\text{из}}} \sqrt{F_0 F_x} (T_0 - T_x), \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность композиции многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции, $\delta_{\text{из}}$ – толщина теплоизоляции, F_0 , F_x – площади, соответственно, теплой и

холодной поверхностей, T_x – температура холодной поверхности, T_0 – температура окружающей среды.

В практике резервуаростроения, как правило, используют два основных способа определения теплового потока к продукту через экранно-вакуумную изоляцию:

1. прямое измерение потерь массы в процессе хранения с открытым газосбросом;
2. непрямая оценка путем измерения объемного расхода через газосброс.

При этом, несмотря на высокую точность результатов, достигаемую использованием каждого из перечисленных методов, при применении полученного значения не учитывается ряд факторов. Во-первых, речь идет о возможном ухудшении условий теплоизоляции в связи с частичной потерей вакуума в процессе многолетней эксплуатации сосуда. Даже незначительное изменение значения давления в вакуумной полости может существенно повлиять на изменение времени хранения вплоть до аварийных режимов, когда продолжительность хранения составляет считанные часы или даже минуты. Во-вторых, как видно из формулы (1), теплоприток напрямую зависит от разности температур между холодной стенкой внутреннего сосуда и окружающей средой. Следовательно, при изменении внешних условий будет существенно варьироваться величина теплопритока.

Согласно современным международным стандартам [CEN EN 12213-1998; IMDG, 2016], которыми руководствуются производители мультимодальных криогенных контейнеров, при определении времени хранения продукта принимается основное допущение, что в процессе теплообмена жидкость находится в термодинамическом равновесии со своим паром. В табл. 1 приведены типичные заводские данные для мультимодального криогенного оборудования [Черемных, 2018; Солдатов, Архаров, 2019] по времени бездренажного хранения различных криогенных жидкостей в танк-контейнерах.

Таблица 1
Table 1

Характеристики стандартных мультимодальных контейнеров для перевозки сжиженных криогенных газов

Parameters of standard multimodal containers for liquefied cryogenic gases transportation

Размерность ISO-контейнера	Вместимость в литрах	Максимальное рабочее давление, МПа	Время хранения продукта, сут.		
			Азот	Кислород	СПГ
20'	20370	1,0	54	79	-
	20160	1,8	70	102	-
	20080	2,4	79	114	-
40'	40000	0,6	-	-	60
	43500	1,0	-	-	132

Приведенные в табл. 1 данные по времени хранения рассчитаны сугубо теоретически, и на практике при реализации любого из возможных режимов эксплуатации продолжительность бездренажного хранения значительно сокращается [Chen et al., 2009; Ryou et al., 2013]. В стационарном режиме определяющим гидродинамическим процессом при хранении является естественная конвекция в замкнутом объеме [Зарубин, 2015], а ключевым фактором, влияющим на ускоренный рост давления в паровой фазе резервуара, становится температурная и компонентная стратификация [Солдатов, 2019]. За счет расслоения рост давления газа будет идти существенно быстрее, чем при теоретическом равновесном процессе.

В транспортных режимах реализуется совсем иная картина гидродинамики и теплообмена. В процессе движения цистерны, контейнера или топливного бака происходит интенсивное перемешивание жидкости и пара, за счет чего процесс изохорного нагрева смеси жидкость-пар в сосуде приближается к равновесному теоретическому

[Домашенко, 2005]. То есть время хранения в такой ситуации существенно выше, чем в стационарных режимах. При этом после смены режима со стационарного на транспортный, в отсутствие предварительного прогрева всего объема жидкости, возможно снижение давления в сосуде после начала транспортировки.

С другой стороны, динамические нагрузки приводят к возникновению диссипативных явлений, обуславливающих дополнительный теплоприток к продукту, в общем случае определяемый следующим образом [Домашенко, 2009]:

$$q_F = \frac{dE_\mu}{Sdt} + \frac{dE_\sigma}{Sdt} + \frac{dE_H}{Sdt},$$

где q_F – тепловой поток, отнесенный к единице площади свободной поверхности криогенной жидкости, $[dE_\mu/(Sdt)]$ – диссипация энергии волнового движения жидкости, $[dE_\sigma/(Sdt)]$ – диссипация энергии, связанная с образованием новой поверхности капель жидкости, $[dE_H/(Sdt)]$ – диссипация энергии, связанная с преобразованием потенциальной энергии вылетевших капель при их ударе о поверхность жидкости.

При наличии различного рода колебаний жидкости до 90 % тепловых потерь связано с диссипацией потенциальной энергии вылетающих капель, то есть ключевым явлением, вызывающим потери продукта, является интенсивное каплеобразование.

Система компьютерного моделирования и мониторинга тепломассообменных процессов при долговременном хранении криогенных жидкостей

Для решения поставленной задачи предлагается использование комплексной системы компьютерного моделирования и мониторинга тепломассообменных процессов при длительном хранении криопродуктов в резервуарах и цистернах. Схема рассматриваемой системы представлена на рис. 1. Исходной информацией при подготовке моделей являются геометрические параметры сосудов, данные о теплопритоках через изоляцию, а также теплофизические параметры реальных газов, рассчитанные по соответствующим пакетам термодинамических свойств. В моделирующем программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent производится подготовка компьютерных моделей, описывающих процесс нестационарного нагрева содержимого криогенной емкости. Последующая корректировка моделей проводится по данным верификационного модуля, осуществляющего компарирование температурных полей и значений давления в газовой фазе. Типичные результаты моделирования температурного поля для сжиженного природного газа приведены в табл. 2.

По результатам моделирования производится накопление базы данных теплофизических параметров в виде нестационарных температурных полей и давлений в паровом пространстве внутреннего сосуда.

Из этой информации по запросу от вычислительного модуля формируется массив данных давления и времени хранения, из элементов которого впоследствии и определяется искомая величина прогнозируемого времени бездренажного хранения.

Характерным отличием танк-модулей транспортных емкостей $MT1, MT2, \dots$ от модулей стационарных емкостей $MS1, MS2, \dots$ (см. рис. 1) является наличие информации от датчиков механических колебаний, возникающих в процессе перемещения цистерны или контейнера любыми видами транспорта: автомобильным, железнодорожным, морским, воздушным.

На единый пульт диспетчерской службы аккумулируется информация со всего парка стационарных и транспортных сосудов, а именно: данные по давлению и уровню жидкого продукта в каждой емкости, техническое состояние теплоизоляции, реализуемый в данный момент времени режим хранения (стационарный или транспортный), прогнозируемое время до момента открытия предохранительных клапанов (время бездренажного хранения).

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета температурного поля в газовом пространстве резервуара для СПГ
The results of the calculation of the temperature field in the gas space of the LNG tank

$h, \text{ м}$	$T_g, \text{ К}$		
	Расчет по модели турбулентности « $k-\epsilon$ »	Расчет по модели турбулентности « $RNG k-\epsilon$ »	Эталонные (экспериментальные) значения
0	111	111	111
0,125	116	115	115
0,250	119	118	118
0,375	123	121	120
0,500	140	137	131
0,625	162	159	144
0,750	179	174	162
0,875	227	218	206
1,000	264	256	243

Примечание: h – вертикальная координата; T_g – температура газовой фазы.

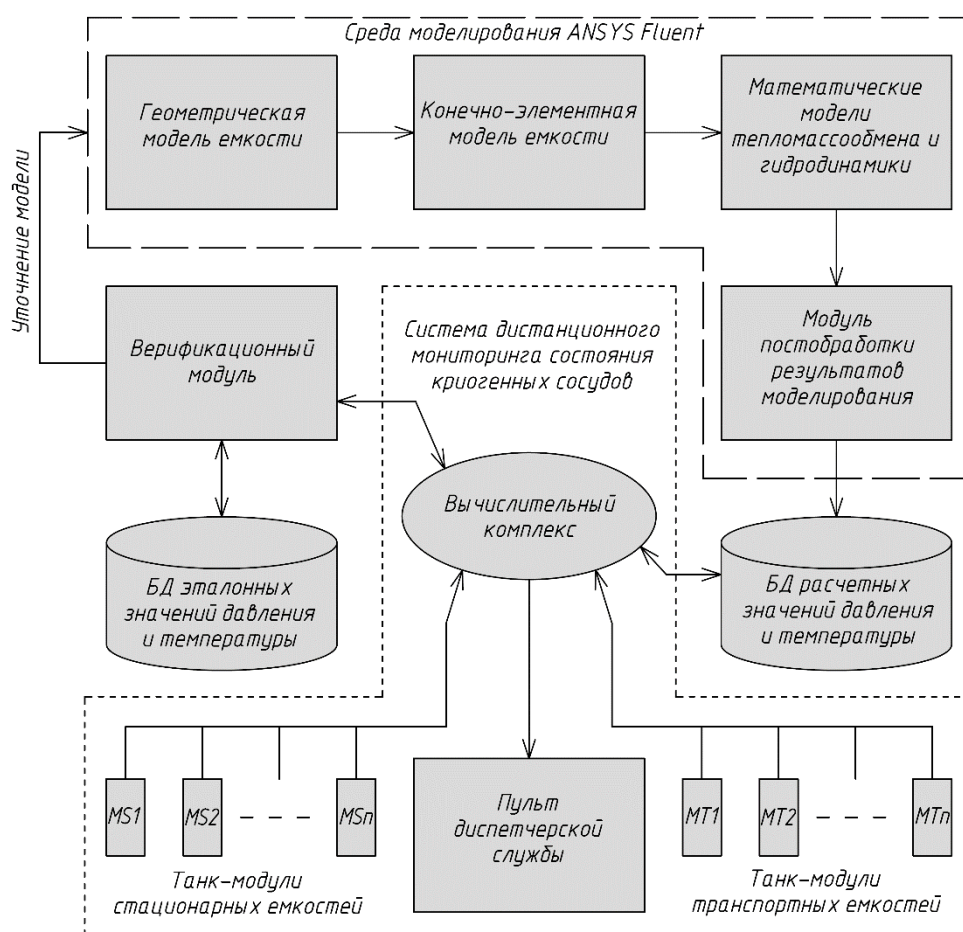


Рис. 1. Функциональная структура системы компьютерного моделирования и мониторинга теплообменных процессов при хранении криогенных жидкостей в стационарных и транспортных сосудах

Fig. 1. Functional structure of the computational modeling and monitoring system for heat and mass transfer processes during storage of cryogenic liquids in stationary and transport vessels

Описание вычислительного алгоритма определения времени бездренажного хранения

Танк-модуль аккумулирует информацию от датчиков давления, температуры, механических колебаний, установленных на криогенном резервуаре или цистерне, и осуществляет передачу данных по беспроводной сети [Кукушкин и др., 2004; Brumbi, Van Zyl, 2009; Константинов и др., 2015;] на вычислительный комплекс, включающий ряд расчетных модулей. Время бездренажного хранения T_{xp} в этом случае будет являться функцией следующих параметров:

$$T_{xp} = f(p_g, p_{ж}, p_{вак}, T_0^u, A_{np}, f_{np}, A_n, f_n),$$

где p_g – давление в газовой фазе емкости, $p_{ж}$ – давление в жидкостной фазе емкости, $p_{вак}$ – давление в вакуумной полости, T_0^u – измеренное значение температуры окружающей среды, A_{np} , f_{np} – соответственно, амплитуда и частота продольных колебаний, A_n , f_n – соответственно, амплитуда и частота поперечных колебаний.

В случае преобладания в процессе эксплуатации танк-контейнеров транспортировок морским транспортом, опционально возможен учет информации от датчиков угловых колебаний.

Мгновенное значение уровня жидкости в емкости (рис. 2) вычисляется по формуле:

$$L_{ж} = \frac{p_{ж} - p_g}{\rho_{ж} \cdot g},$$

где $p_{ж}$, p_g – давление, соответственно, в жидкостной и паровой фазах, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. После того как стал известен уровень, вычисляется площадь свободной поверхности жидкости F_f , согласно исходным данным по геометрическим характеристикам вертикальных и горизонтальных сосудов.

Далее производится проверка соответствия значения уровня жидкости заданному безопасному диапазону

$$L_n^{kp} < L_{ж} < L_v^{kp},$$

где L_n^{kp} и L_v^{kp} – соответственно, нижний и верхний критические уровни в резервуаре, задаваемые согласно требованиям документации от изготовителя сосуда и с учетом условий эксплуатации. Как правило, L_v^{kp} соответствует максимально разрешенной степени заполнения большинства сосудов 0,95...0,98 (0,9 для топливных баков со сжиженным природным газом [ГОСТ Р 56021–2014]), а L_n^{kp} определяется величиной несливаемого остатка, взятой с коэффициентом запаса 1,5...2. В случае если уровень жидкости слишком низкий или слишком высокий, производится формирование и отправка аварийного сообщения в диспетчерский центр.

Характерной особенностью используемого типа танк-модулей является возможность передавать данные от датчика уровня вакуума в межсосудной полости резервуара. Возрастание давления в вакуумной полости за счет возможного натекания газа извне (например, при наличии микротрещин во внешнем сосуде или в местах соединений сосуда и патрубков) приводит к ухудшению тепловой изоляции за счет интенсификации теплопереноса остаточным газом $Q_{газ}$. С учетом полученного от датчика мгновенного значения давления вакуума $p_{вак}$ расчет дополнительного теплового потока за счет газа в межсосудном пространстве производится по формуле [Архаров, 1999]:

$$Q_{газ} = \alpha \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \frac{18,2 p_{вак} (T_0^u - T_x) F_x}{\sqrt{MT_0}},$$

где α – коэффициент аккомодации, учитывающий неполноту обмена энергией между молекулами и поверхностью, k – показатель адиабаты, M – молекулярная масса вещества продукта.

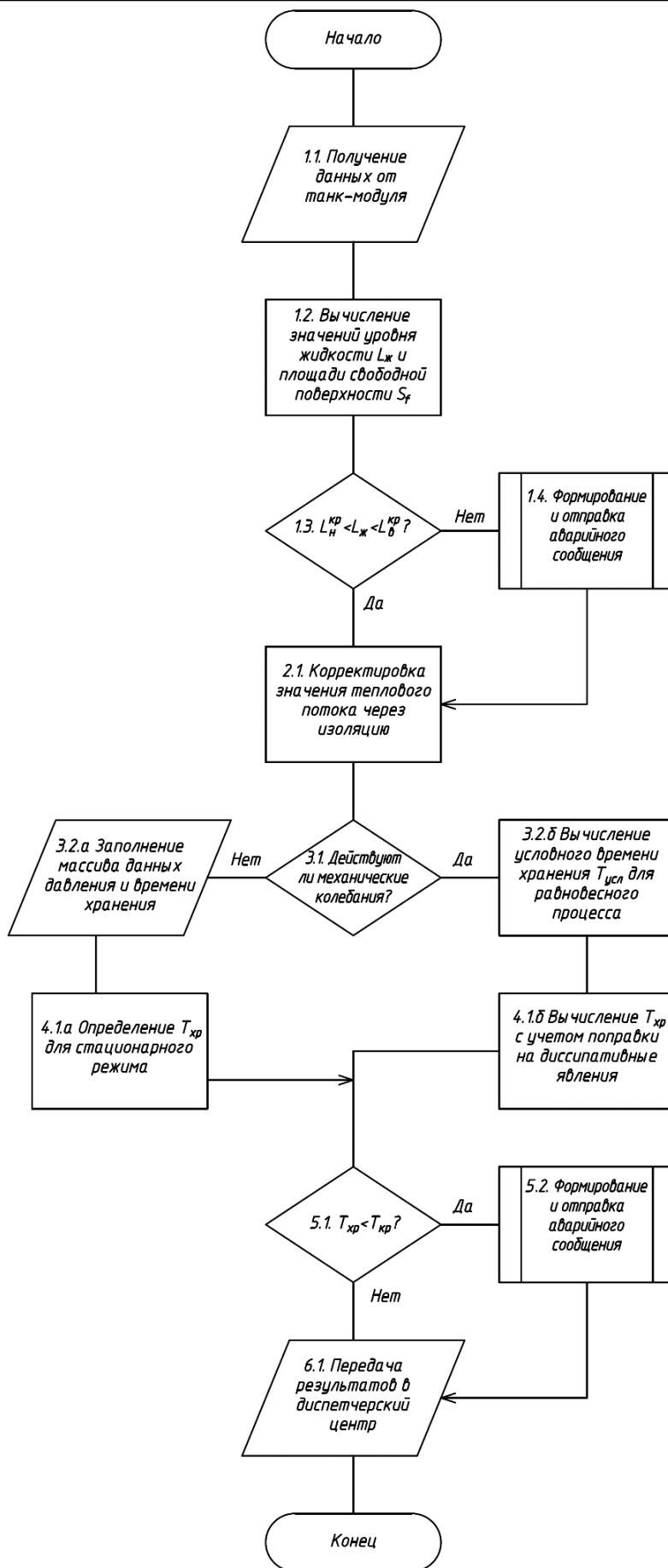


Рис. 2. Алгоритм расчета прогнозируемого времени хранения криопродукта
 Fig. 2. Algorithm for calculating the predicted storage time for cryoprotectant

В итоге тепловой поток через изоляцию $Q_{из}$ вычисляется следующим образом:

$$Q_{из} = \frac{T_0^u - T_x}{T_0 - T_x} Q_{\delta\delta} + Q_{газ},$$

где $Q_{\delta\delta}$ – нормальный тепловой поток через изоляцию для рассматриваемой криогенной емкости, $T_0 = 293 \text{ K}$ – нормальная температура окружающей среды. Затем переменной $Q_{из}$ присваивается значение ближайшего к ней по величине элемента Q'_k из массива данных тепловых потоков, использовавшихся в конечно-элементном анализе процессов теплообмена при заполнении базы данных температурных полей и давлений.

Танк-модуль также передает информацию от датчиков механических колебаний, установленных на танк-контейнере или транспортной цистерне. При отсутствии вынужденных и параметрических колебаний (равно как и при отсутствии на емкости соответствующих датчиков) дальнейший расчет ведется для стационарного режима.

В этом случае в вычислительный модуль загружается массив данных времени $T_{xp,i}$ и давления хранения $p_{xp,j}$, соответствующих рассчитанному ранее тепловому потоку.

Из массива выбирается наибольший элемент, удовлетворяющий условию

$$p_{xp,j} < p_{max},$$

где p_{max} – заданное максимальное разрешенное давление в сосуде. Соответствующее выбранному элементу значение $T_{xp,i}$ является искомым прогнозируемым временем хранения.

В случае если полученная величина T_{xp} оказывается меньше заданного значения критического давления $T_{кр}$, системой производится формирование и отправка аварийного сообщения на пульт диспетчерской службы.

Порядок учета увеличения теплового потока за счет вынужденных колебаний

С учетом того что в транспортном режиме продолжительность бездренажного хранения жидкости несколько выше, чем в неподвижном состоянии, но, с другой стороны, все же ниже, чем теоретическое условное время хранения в равновесном процессе, имеет смысл производить расчет времени хранения в два этапа:

1. На первом этапе производится расчет теоретического времени хранения, исходя из допущения, что в процессе изохорного нагрева жидкость находится в равновесии со своим паром. Таким образом определяется условное время хранения $T_{усл}$.

2. На втором этапе производится корректировка величины теплового потока с учетом дополнительного слагаемого, обусловленного диссипативными явлениями, и вычисляется время хранения T_{xp} для транспортного режима.

При интенсивном процессе каплеобразования расчетная величина T_{xp} на 25-30 % ниже теоретического значения $T_{усл}$.

Стоит обратить внимание, что при приближении процесса тепломассообмена к равновесному в транспортном режиме, необходимо учитывать перемещение границы раздела фаз в процессе хранения. Согласно международным стандартам [ДОПОГ, 2018] максимальный уровень заполнения жидкостью сосудов с горючими газами должен быть таким, чтобы после полного прогрева основной массы жидкости до температуры, равновесной максимально допустимому рабочему давлению, степень заполнения сосуда жидкостью не превышала 98 %. Это накладывает серьезные ограничения при выборе начальной степени заполнения сосуда криопродуктом. С другой стороны, если руководствоваться не максимально возможным рекомендованным уровнем жидкости, а обоснованным и рассчитанным для конкретного режима эксплуатации временем хранения, то, при условии пересмотра в будущем соответствующих пунктов международных стандартов, было бы целесообразно выбирать более выгодную с технико-экономической точки зрения начальную степень заполнения.

Заключение

Проанализированы положения основных нормативных документов по мультимодальным перевозкам сжиженных криогенных газов, касающиеся ключевых характеристик транспортных емкостей, а именно: времени бездренажного хранения и максимально допустимой степени заполнения сосуда жидкостью, в том числе при перевозке различными видами транспорта горючих газов. Рассмотрены основные подходы к расчету теплопритока к криопродукту через изоляцию, проанализированы главные факторы, влияющие на изменение данного параметра в процессе эксплуатации стационарных и транспортных емкостей.

Описано основное содержание комплексной системы компьютерного моделирования и мониторинга теплообменных процессов, адаптированной для использования со стационарными резервуарами и цистернами, а также мультимодальными танк-контейнерами. Предложен алгоритм расчета времени хранения, позволяющий рассчитывать как стационарные, так и транспортные режимы в течение хранения. Алгоритм также учитывает возможное ухудшение теплоизоляционных свойств криогенного резервуара. Обеспечена возможность своевременного информирования диспетчерских служб и формирования уточненного прогноза при аварийной ситуации, в частности, в случае потери вакуума в межсудном пространстве.

По результатам анализа вопроса о выборе начальной степени заполнения сосуда рекомендовано в качестве характеристики процесса тепломассообмена ориентироваться на прогнозируемое время бездренажного хранения, вычисленное для заданного режима транспортировки и хранения. Внедрение предложенной системы мониторинга для конкретного парка стационарных и транспортных криогенных сосудов позволит существенно повысить безопасность эксплуатации за счет обеспечения технологических процессов без сброса горючих газов в атмосферу.

Список литературы

1. Архаров А.М. 1999. Криогенные системы. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. М.: Машиностроение, 720.
2. ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Дата введения 15.05.2014.
3. Дедюлин С.К. Канунникова Е.А. Корсунов Н.И. 2012. Анализ возможности сокращения общего времени работы алгоритма решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 12 (132): 160–165.
4. Домашенко А.М. 2005. Тепломассообмен в стационарных и транспортных криогенных резервуарах, его влияние на эксплуатационные характеристики. Альтернативная энергетика и экология. 3: 32–38.
5. Домашенко А.М. 2009. Тепломассообмен и гидродинамика в криогенных топливных системах на объектах наземного и морского базирования. Альтернативная энергетика и экология. 3: 12–60.
6. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ). Т. 2. Издание организации объединенных наций. Нью-Йорк и Женева. 2018.
7. Зарубин В.С. 2015. Математическое моделирование температурного состояния оболочки цилиндрической криогенной емкости при заполнении и опорожнении. Математика и математическое моделирование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 6: 44–60.
8. Константинов И.С. Лазарев С.А. Польщиков К.А. 2015. Математическое моделирование передачи информационных потоков в беспроводной самоорганизующейся сети специального назначения. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 19 (216): 101–109.
9. Кукушкин Ю.А. Богомолов А.В. Ушаков И.Б. 2004. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем. Информационные технологии (приложение). 7: 32.
10. Маторин С.И. Жихарев А.Г. Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектное имитационное моделирование транспортных и технологических процессов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 7 (204): 159–169.

11. Рудаков И.С. Рудаков С.В., Богомолов А.В. 2007. Методика идентификации вида закона распределения параметров при проведении контроля состояния сложных систем. Информационно-измерительные и управляющие системы. 5(1): 66–72.
12. Рудаков С.В. Богомолов А.В. 2013. Методика расчета напряженности электростатического поля в изоляции многожильных кабелей. Безопасность в техносфере. 2(1): 39–43.
13. Солдатов Е.С. 2019. Моделирование процессов тепломассообмена в криогенном резервуаре долговременного хранения сжиженного природного газа. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 1 (46): 92–98.
14. Солдатов Е.С. Архаров И.А. 2019. Анализ схемных решений в системах реконденсации паров сжиженного природного газа для транспортных и стационарных резервуаров долговременного хранения. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2: 263–276.
15. Черемных О.Я. 2018. Перспектива развития транспортных средств для сжиженного природного газа. Инженерный журнал: наука и инновации. 1: 1–20.
16. Brumbi D. Van Zyl I. 2009. Modern technologies for Level Measurement. Proceedings of Sensor+Test Conference: 97–102.
17. CEN EN 12213-1998. Cryogenic vessels – Methods for performance evaluation of thermal insulation. Date of introduction 18.11.1998.
18. Chen Y.-G. Price W.G. Temarel P. 2009. Numerical simulation of liquid sloshing in LNG tanks using a compressible two-fluid flow model. Proceedings of the 19-th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan: 221–230.
19. International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code, 2016 Edition. Date of introduction 04.08.2016.
20. Lisowski E., Czyzycki W. 2011. Transport and storage of LNG in container tanks. Journal of Kones Powertrain and Transport. Vol. 18(3): 193–201.
21. Peric M. Zorn T. Moctar O. Shellin T. Kim Y.-S. 2009. Simulation of sloshing in LNG-tanks. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 131(3): 1–11.
22. Ryou Y.-D. Lee J.-H. Jo Y.-D. 2013. Internal pressure variation analysis and actual holding time test on ISO LNG tank container. KIGAS. 17 (6): 1–7.
23. Zienkiewicz O.C. Taylor R.L. Nithiarasu P. 2014. The Finite Element Method for Fluid Dynamics. Butterworth-Heinemann, Elsevier. 544.

References

1. Arkharov A.M. 1999. Kriogenyye sistemy. T. 2. Osnovy proyektirovaniya apparatov, ustanovok i system [Cryogenic systems. V.2. Basic engineering for devices, facilities and systems]. Pod obshch. red. A.M. Arkharova i A.I. Smorodina. Moscow: Mashinostroyeniye, 720.
2. GOST R 56021–2014. Gas combustible natural liquefied. Fuel for internal combustion engines and power plants. Date of introduction 15.05.2014. (in Russian)
3. Dedyulin S.K. Kanunnikova E.A. Korsunov N.I. 2012. Analysis of the possibility of reducing the total time of the algorithm for solving differential equations by the finite element method. Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies. 12 (132): 160–165. (in Russian)
4. Domashenko A.M. 2005. Heat and mass transfer in stationary and transport cryogenic tanks, its effect on operating parameters. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 3: 32–38. (in Russian)
5. Domashenko A.M. 2009. Heat and mass transfer and hydrodynamics in cryogenic fuel systems for ground-based and sea-based objects. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 3: 12–60. (in Russian)
6. European agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR). Vol. II. United Nations Edition. New York and Geneva. 2018.
7. Zarubin V.S. 2015. Mathematical modeling of the thermal shell state of the cylindrical cryogenic tank during filling and emptying. Mathematics and mathematical modeling. Electronic journal of Bauman MSTU. 6: 44–60. (in Russian)
8. Konstantinov I.S. Lazarev S.A. Polschikov K.A. 2015. Mathematical modeling of information flows transmission in mobile ad-hoc network for special purposes. Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies. 19 (216): 101–109. (in Russian)
9. Kukushkin Yu.A. Bogomolov A.V. Ushakov I.B. 2004. Mathematical software for assessing the state of material systems. Information technology (application). 7: 32. (in Russian)

10. Matorin S.I. Zhikharev A.G. Zaitseva N.O. 2015. System-object simulation of transport and technological processes. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies.* 7 (204): 159–169. (in Russian)
11. Rudakov I.S. Rudakov S.V., Bogomolov A.V. 2007. Methods of identifying the type of law of distribution of parameters when monitoring the status of complex systems. *Information and measuring and control systems.* 5 (1): 66–72. (in Russian)
12. Rudakov S.V. Bogomolov A.V. 2013. The method of calculating the electrostatic field strength in the insulation of stranded cables. *Security in the technosphere.* 2 (1): 39–43. (in Russian)
13. Soldatov E.S. 2019. Modeling of heat and mass transfer processes in the cryogenic reservoir of long-term storage liquefied natural gas. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies.* 1 (46): 92–98. (in Russian)
14. Soldatov E.S. Arkharov I.A. 2019. Analysis of diagram solutions in the systems of recondensation of liquefied natural gas vapors for transport and stationary tanks of long-term storage. *Tula State University news. Technical science.* 2: 263–276. (in Russian)
15. Cheremnykh O.Ya. 2018. Prospects of developing vehicles for liquefied natural gas. *Engineering Journal: Science and Innovation.* 1: 1–20. (in Russian)
16. Brumbi D. Van Zyl I. 2009. Modern technologies for Level Measurement. *Proceedings of Sensor+Test Conference:* 97–102.
17. CEN EN 12213-1998. Cryogenic vessels – Methods for performance evaluation of thermal insulation. Date of introduction 18.11.1998.
18. Chen Y.-G. Price W.G. Temarel P. 2009. Numerical simulation of liquid sloshing in LNG tanks using a compressible two-fluid flow model. *Proceedings of the 19-th International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan:* 221–230.
19. International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code, 2016 Edition. Date of introduction 04.08.2016.
20. Lisowski E., Czyzycki W. 2011. Transport and storage of LNG in container tanks. *Journal of Kones Powertrain and Transport.* Vol. 18(3): 193–201.
21. Peric M. Zorn T. Moctar O. Shellin T. Kim Y.-S. 2009. Simulation of sloshing in LNG-tanks. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* 131(3): 1–11.
22. Ryou Y.-D. Lee J.-H. Jo Y.-D. 2013. Internal pressure variation analysis and actual holding time test on ISO LNG tank container. *KIGAS.* 17 (6): 1–7.
23. Zienkiewicz O.C. Taylor R.L. Nithiarasu P. 2014. *The Finite Element Method for Fluid Dynamics.* Butterworth-Heinemann, Elsevier. 544.

Ссылка для цитирования статьи

Reference to article

Солдатов Е.С. 2019. Вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криопродуктов в стационарных и транспортных сосудах. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика.* 46 (3): 485–495. 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.

Soldatov E.S. 2019. Computational algorithm for predicting the time of non-drain cryoproducts storage in stationary and transport vessels. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies.* 46 (3): 485–495 (in Russian). 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.