

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СТАЦИОНАРНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СОСУДАХ С КРИОПРОДУКТАМИ

Е.С. Солдатов (Балашиха)

Представлена функциональная структура системы имитационного моделирования процессов теплообмена при длительном хранении криопродуктов в стационарных и транспортных сосудах и вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криогенных продуктов, обеспечивающий возможность учета изменяющихся режимов эксплуатации емкостного оборудования и технического состояния тепловой защиты жидкостных криогенных систем.

Ключевые слова: имитационное моделирование, компьютерное моделирование, сосуды с криопродуктами, жидкостные криогенные системы, время бездренажного хранения криогенных жидкостей.

В задачах моделирования теплообмена при долговременном хранении криопродуктов в транспортных и стационарных сосудах основную сложность представляет необходимость учета множества факторов, таких как, например, колебаний сосуда при движении различными видами транспорта. Это значительно усложняет модель и требует в процессе расчета дополнительных затрат вычислительных ресурсов [4, 5]. Также актуальными являются вопросы развития и внедрения в промышленности систем дистанционного мониторинга за состоянием криогенных сосудов, работающих под давлением, в том числе, используемых для хранения горючих газов [2, 6].

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 [1]:

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

где $\lambda_{эф}$ – эффективная теплопроводность композиции многослойной экранно-вакуумной теплоизоляции, $\delta_{из}$ – толщина теплоизоляции, F_0, F_x – площади, соответственно, теплой и холодной поверхностей, T_x – температура холодной поверхности, T_0 – температура окружающей среды.

При различных способах определения теплового потока через изоляцию [8] не учитывается ряд факторов. Во-первых, речь идет о возможном ухудшении условий теплоизоляции в связи с частичной потерей вакуума в процессе многолетней эксплуатации сосуда. Во-вторых, как видно из формулы расчета теплового потока через изоляцию, 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 [3, 5, 8], которыми руководствуются производители мультимодальных криогенных контейнеров, при определении времени хранения продукта принимается основное допущение, что в процессе тепломассообмена жидкость находится в термодинамическом равновесии со своим паром. Однако на практике, при реализации любого из возможных режимов эксплуатации, продолжительность бездренажного хранения значительно сокращается [9, 11]. В стационарном режиме определяющим гидродинамическим процессом при хранении является естественная конвекция в замкнутом объеме, а ключевым фактором, влияющим на ускоренный рост давления в паровой фазе резервуара, становится температурная и компонентная стратификация [7].

Для решения поставленных задач по учету дополнительных факторов, оказывающих влияние на теплообмен, предлагается использование комплексной системы имитационного моделирования и мониторинга тепломассообменных процессов при длительном хранении криопродуктов в резервуарах и цистернах. Схема рассматриваемой системы представлена на рис.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

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 ANSYSFluent производится подготовка компьютерных моделей, описывающей процесс нестационарного нагрева содержимого криогенной емкости.

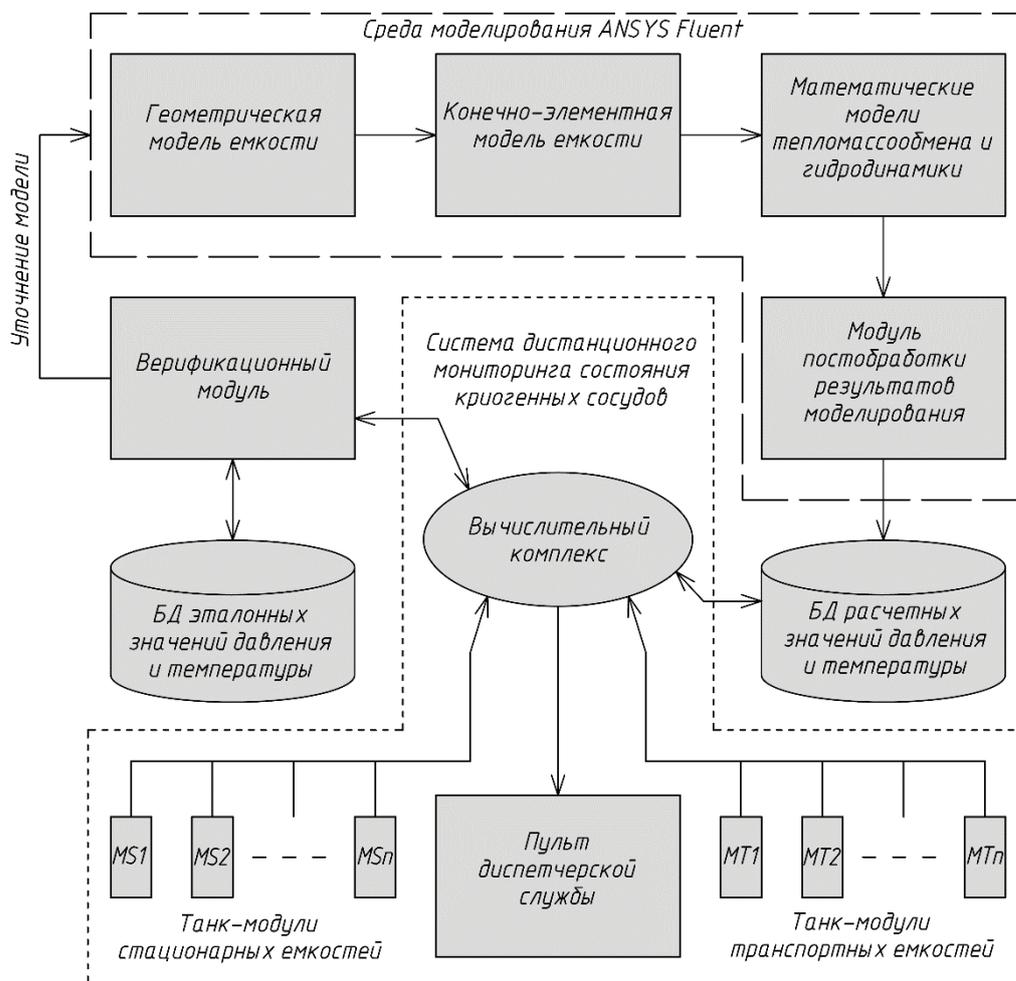


Рис. 1. Функциональная структура системы кимитационного моделирования и мониторинга теплообменных процессов при хранении криогенных жидкостей в стационарных и транспортных сосудах

Последующая корректировка моделей проводится по данным верификационного модуля, осуществляющего компарирование температурных полей и значений давления в газовой фазе.

По результатам моделирования производится накопление базы данных теплофизических параметров в виде нестационарных температурных полей и давлений в паровом пространстве сосуда. Из этой информации по запросу от вычислительного модуля формируется массив данных, 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 $MS1, MS2, \dots$ (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

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

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).

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

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

где p_g – давление в газовой фазе емкости, $p_{жс}$ – 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.

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

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

где $p_{жс}$, p_g – давление, соответственно, в жидкостной и паровой фазах, $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. После того как 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

$$L_n^{кр} < L_{жс} < L_b^{кр},$$

где $L_n^{кр}$ и $L_b^{кр}$ – соответственно, нижний и верхний критические уровни в резервуаре, задаваемые согласно требованиям документации от изготовителя сосуда и с учетом условий эксплуатации. 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 натека газа извне 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 [1, 6]:

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

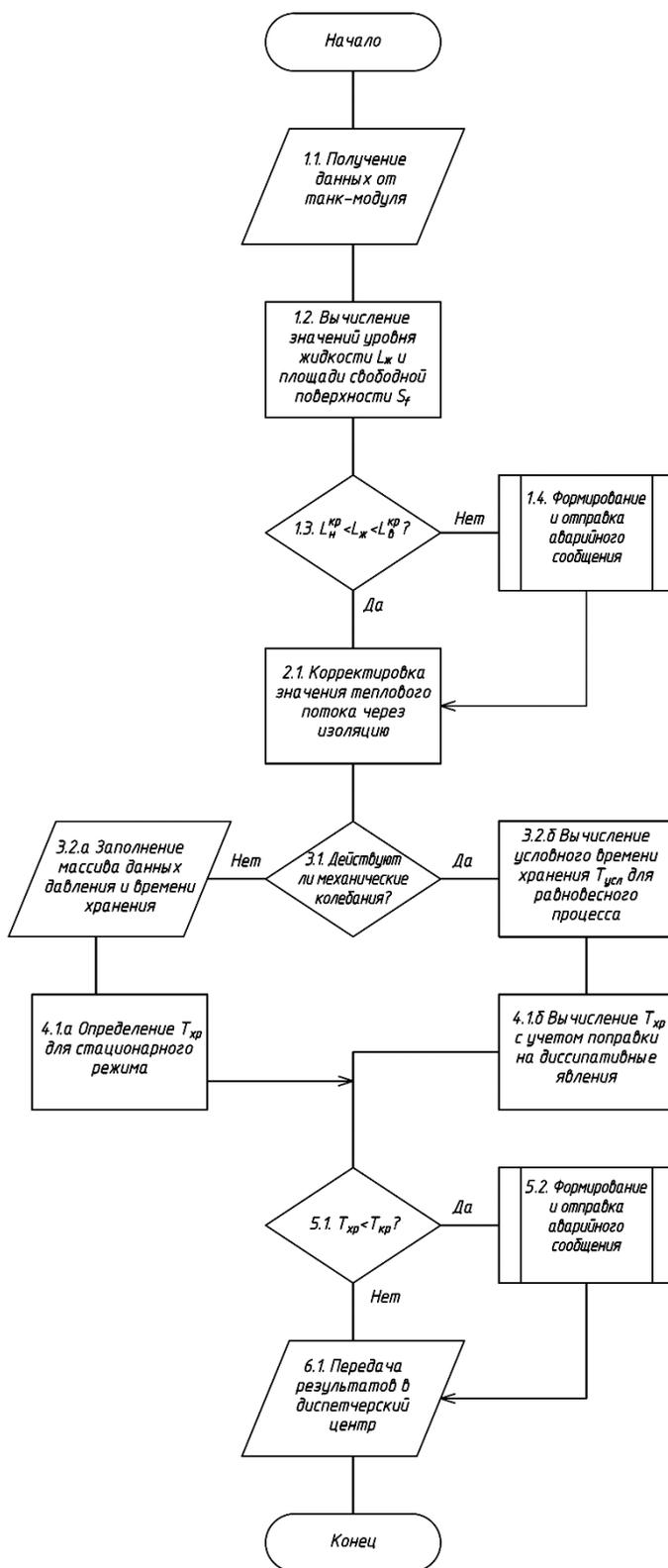


Рис. 2. Алгоритм расчета прогнозируемого времени хранения криопродукта

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

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

где α – коэффициент аккомодации, учитывающий неполноту обмена энергией между молекулами и поверхностью, k – показатель адиабаты, M – молекулярная масса вещества продукта. В итоге тепловой поток через изоляцию $Q_{из}$ вычисляется следующим образом:

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

где $Q_{бд}$ – 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.

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 [3, 10] 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

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

стандартов, было бы целесообразно выбирать более выгодную с технико-экономической точки зрения начальную степень заполнения.

Выводы

при выборе начальной степени заполнения криогенного сосуда, целесообразно ориентироваться на прогнозируемое время бездренажного хранения криопродукта, вычисленное для заданного режима транспортировки и хранения. Разработанный вычислительный алгоритм позволяет учитывать состояние вакуумной теплоизоляции, а также ретроспективные данные по режимам хранения и транспортировки. 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. Перспективной является задача дальнейшего совершенствования методов имитационного моделирования процессов при помощи конечно-элементного анализа с точки зрения сокращения затрат вычислительных ресурсов при сохранении требуемой точности результатов.

Литература

1. Архаров А.М. Криогенные системы. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.
2. ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Дата введения 15.05.2014.
3. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ). Т. 2. Издание организации объединенных наций. Нью-Йорк и Женева. 2018.
4. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ушаков И.Б. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем // Информационные технологии. 2004. № 7 (приложение). 32 с.
5. Солдатов Е.С., Архаров И.А. Анализ термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 300-303.
6. Солдатов Е.С. Численное исследование нестационарного тепломассообмена в криогенном резервуаре долговременного хранения с подвижной границей раздела фаз // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 2. С. 148-159.
7. Солдатов Е.С. Моделирование процессов тепломассообмена в криогенном резервуаре долговременного хранения сжиженного природного газа // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. 1 (46): 92-98.
8. CEN EN 12213-1998. Cryogenic vessels – Methods for performance evaluation of thermal insulation. Date of introduction 18.11.1998.
9. 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.
10. International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code, 2016 Edition. Date of introduction 04.08.2016.
11. 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.