

УДК 004.046+004.942

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-157-168

Функциональное моделирование мониторинга состояния системы хранения криопродуктов на примере сжиженного природного газа

Солдатов Е.С.

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39
E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения безопасности и снижения потерь при хранении и транспортировке криопродуктов в системах хранения различного типа. Представлена функциональная модель системы дистанционного мониторинга состояния систем хранения криопродуктов. Задачей системы мониторинга является обеспечение удаленного мониторинга состояния систем хранения криопродуктов, в том числе, с возможностью на основе результатов компьютерного моделирования прогнозировать время бездренажного хранения криопродукта. В рассмотренной схеме функционально разделены задачи по накоплению массива рабочих параметров хранения, определяющихся, как правило, при помощи компьютерного моделирования, и вычисление текущих характеристик конкретного процесса в режиме реального времени. Рассмотрена процедура вычисления нестационарных параметров бездренажного хранения на примере систем хранения сжиженного природного газа.

Ключевые слова: функциональное моделирование, дистанционный мониторинг, танк-контейнер, бездренажное хранение, тепломассообмен, IDEF0, CFD

Для цитирования: Солдатов Е.С. 2024. Функциональное моделирование мониторинга состояния системы хранения криопродуктов на примере сжиженного природного газа. Экономика. Информатика. 51(1): 157–168. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-157-168

Functional Modeling of Monitoring the State of Cryoprodukt Storage Systems on the Example of Liquefied Natural Gas

Evgeny S. Soldatov

Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
39, 14 line V.O., Saint Petersburg, 199178, Russia
E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru

Abstract. The issues of improving safety and reducing losses during storage and transportation of cryoprodukts in storage systems of various types are considered. A functional model of a system for remote monitoring of the state of cryoprodukt storage systems is presented. The task of the monitoring system is to provide remote monitoring of the state of cryoprodukt storage systems, including the possibility to predict the time of non-drainage storage of cryoprodukt based on computational modeling data. In considered scheme, the tasks of accumulating an array of operating parameters, which are usually determined using computational modeling, and calculating the current characteristics of a particular process in real time are functionally separated. The procedure for calculating non-stationary parameters of non-drainage storage is considered on the example of liquefied natural gas. Graphs of tank pressure changes at different values of the liquid level in the tank are presented. Using of the proposed functional model for monitoring the condition of cryogenic storage systems ensures that responsible persons are provided with current information on the parameters of non-drainage storage of cryogenic products in real time. This allows to take timely measures to prevent product losses during storage, as well as prevent the occurrence of an explosion and fire hazard.

Keywords: functional modeling, remote monitoring, tank container, non-drainage storage, heat and mass transfer, IDEF0, CFD

For citation: Soldatov E.S. 2024. Functional Modeling of Monitoring the State of Cryoprodut Storage Systems on the Example of Liquefied Natural Gas. Economics. Information technologies. 51(1): 157–168. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-1-157-168

Введение

В развитии промышленности и других отраслей экономики России особое место занимают вопросы повышения безопасности и снижения потерь при хранении и транспортировке опасных веществ. В частности, для предприятий топливно-энергетического комплекса, машиностроения, металлургии, химической и нефтехимической промышленности, пищевой промышленности, для объектов сельского хозяйства и здравоохранения актуальными являются вопросы эффективной эксплуатации систем хранения криопродуктов [Ряжских и др., 2020; Архаров, 2023]. В этом аспекте ключевую роль играет исследование теплофизических процессов в закрытом сосуде при хранении и транспортировке, в первую очередь, таких криопродуктов как жидкий азот, жидкий кислород, жидкий аргон, жидкий водород и сжиженный природный газ (СПГ). На мировом рынке СПГ наблюдается устойчивая положительная динамика: в частности, по итогам 2021 года рост составил 5,4 %. При этом, по оценкам аналитиков, среднегодовой темп роста рынка к 2035 году может возрасти вдвое [Исмагилова, Чекушина, 2023].

Несмотря на развивающийся рынок СПГ, опубликовано крайне мало результатов исследований по проблематике транспортировки и хранения СПГ в мультимодальных танк-контейнерах [Vo et al., 2021; Павлова, Чекардовский, 2022; Lee et al., 2023]. Также, несмотря на наличие публикаций по теме бездренажного хранения криопродуктов, в том числе публикаций с результатами компьютерного моделирования процессов тепломассообмена в криогенных сосудах, практически отсутствуют исследования по системному применению результатов моделирования для снижения потерь при хранении и транспортировке криопродуктов в масштабах промышленного кластера или страны в целом.

При этом важнейшей составляющей системного подхода по предотвращению потерь при хранении и транспортировке криопродуктов является организация дистанционного мониторинга тепломассообменных процессов в стационарных и транспортных сосудах, подключенных к единой информационной системе [Soldatov, Bogomolov, 2021].

Функциональная модель мониторинга состояния криогенных систем хранения

Каждую из систем хранения, состояние которой требуется отслеживать в режиме реального времени, необходимо оборудовать средствами телеметрии. В настоящее время на многих объектах производства и потребления криопродуктов уже эксплуатируются телеметрические системы, использующие пересчет уровня жидкости на основе измерения разности давлений в газовой и жидкостной фазах криогенного сосуда. Вычисление параметров производится с учетом поправки на изменение плотности, рассчитанной по показаниям датчика давления. Обеспечена возможность как местной индикации параметров, так и передачи данных на удаленное устройство для контроля процессов хранения, что позволяет службам логистики планировать доставку жидких продуктов без привлечения дополнительных ресурсов со стороны персонала, осуществляющего эксплуатацию криогенных сосудов.

Недостатком применяемых в настоящее время технических и организационных решений является невозможность получения в режиме реального времени информации о прогнозируемом времени хранения криопродукта с учетом технического состояния сосуда, изменяющихся условий окружающей среды и режимов его эксплуатации.

Для решения проблемы отсутствия информации для принятия решений по снижению потерь криопродуктов, помимо прочего, необходимо совершенствование существующих средств телеметрии. На рис. 1 представлена диаграмма верхнего уровня разработанной функциональной модели мониторинга состояния систем хранения различных криопродуктов. В качестве основной задачи дистанционного мониторинга рассматривается предоставление текущей информации для поддержки принятия решений лицами, ответственными за эксплуатацию криогенных сосудов. Также обеспечивается оповещение об аварийных ситуациях и накопление статистической информации о процессе бездренажного хранения. Ключевой особенностью предложенных решений является возможность учета внешних условий хранения (например, температуры окружающей среды), а также ретроспективной информации о процессе хранения (каким был предшествующий режим хранения: стационарным или транспортным), что существенно влияет на текущий прогноз по времени бездренажного хранения криопродукта.



Рис. 1. Контекстная диаграмма функциональной модели мониторинга состояния системы хранения криопродуктов

Fig. 1. Context diagram of a functional model for monitoring the state of a cryogenic products storage system

Схема процесса мониторинга состояния систем хранения представлена на рис. 2. Исходя из опыта эксплуатации, было предложено разделить задачи по определению массива рабочих параметров хранения, а также возможных прогнозируемых значений параметров хранения, определяющихся, как правило, при помощи компьютерного моделирования, и вычисление текущих характеристик конкретного процесса в режиме реального времени.

По результатам моделирования производится накопление базы данных теплофизических параметров в виде значений давления хранения и температуры (см. рис. 3). Из этой информации после постобработки формируется массив данных по времени хранения для конкретных значений давления и уровня жидкости, из элементов которого впоследствии и определяется искомая величина прогнозируемого времени бездренажного хранения.

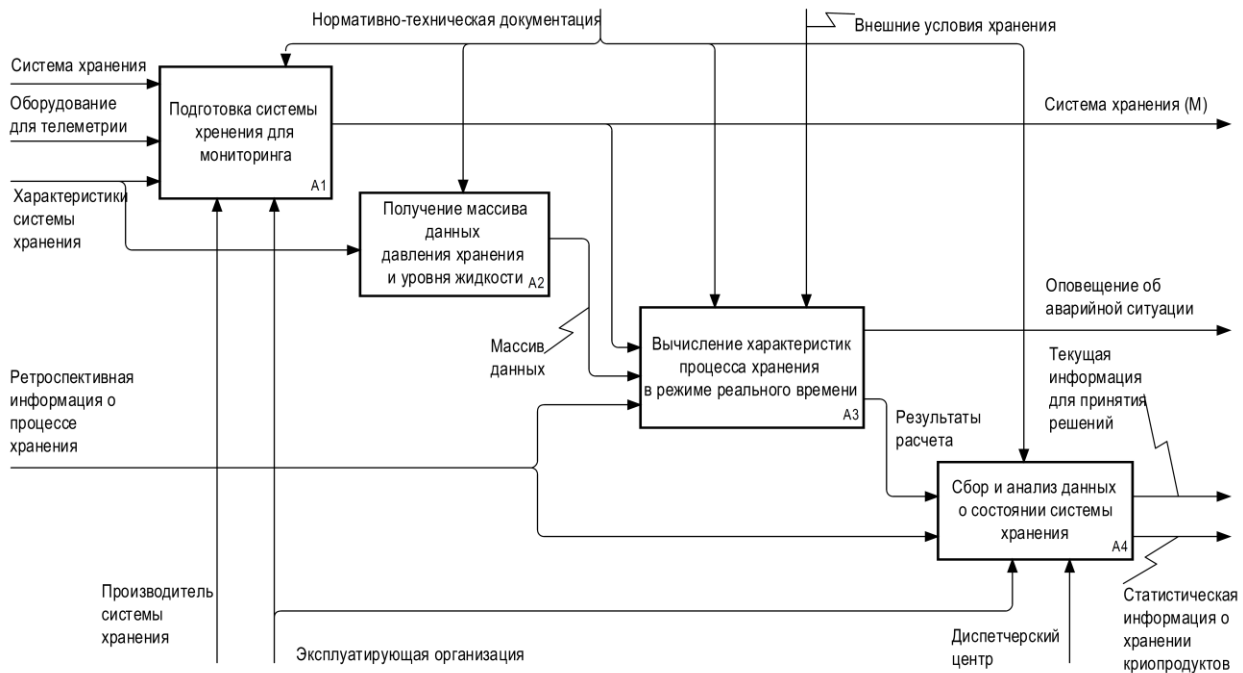


Рис. 2. Декомпозиция процесса мониторинга состояния систем хранения криопродуктов (индекс «М» относится к системе хранения после модернизации)

Fig. 2. Decomposition of the process of monitoring the condition of cryogenic products storage systems (index “M” refers to the storage system after modernization)

Методы накопления массивов данных по изменению параметров бездренажного хранения продукта с течением времени

Для получения массива данных давления хранения и уровня жидкости в зависимости от времени могут применяться следующие методы:

- экспериментальное исследование, в том числе с использованием метода обобщенных переменных [Barsi et al., 2008; Kang et al., 2017];
- численное исследование с применением методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics или CFD);
- статистические методы.

Обработка статистических массивов данных по изменению давления в процессе бездренажного хранения может быть эффективна в среднесрочной перспективе после установки на определенное количество сосудов телеметрического оборудования. При этом для обеспечения работоспособности системы мониторинга отсутствует необходимость в проведении серии трудоемких вычислений.

Применение численного исследования для получения необходимых массивов данных позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований. Также при помощи CFD имеется возможность получить поля распределения интересующих параметров на режимах, для которых отсутствуют статистические данные, в частности, для аварийных режимов, тогда как проведение экспериментов на этих режимах является опасным или экономически нецелесообразным [Huerta et al., 2021; Ustolina et al., 2022]. При этом основными недостатками использования CFD являются необходимость проведения калибровки модели взаимодействия между фазами по экспериментальным или опытным данным, необходимость введения упрощений модели, в том числе в части описания компонентного состава жидкой и паровой фаз, ограниченный спектр режимов работы сосуда, для которых удается получить корректное решение, а также повышенные требования к вычислительным ресурсам [Schlotke et al., 2008].

Модели межфазного взаимодействия в нестационарных расчетах течений в криогенном сосуде

Для получения полей распределения интересующих параметров криопродукта в замкнутой области сосуда требуется проведение расчета многофазного турбулентного течения в нестационарной постановке. Для моделирования двухфазного течения при наличии четкой границы раздела фаз «жидкость-газ» целесообразно применение метода объема жидкости (Volume-of-fluid method или сокращенно VOF) [Chen et al., 2016; Kartuzova et al., 2020].

Обе фазы продукта принимаются многокомпонентными смесями, включающими в свой состав химически не реагирующие друг с другом компоненты. Для многокомпонентной смеси уравнение переноса массовой доли запишется следующим образом:

$$\frac{\delta \rho_i \alpha_i Y_{i,j}}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i Y_{i,j} \bar{V}_i) = \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i D_i \nabla Y_{i,j}) + S_{i,j} + m_{i,j}^{tr}, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -й фазы, α_i – объемная доля i -й фазы, V_i – скорость i -й фазы, $Y_{i,j}$ – массовая доля j -го компонента в i -й фазе, D_i – массовая диффузионная способность, $S_{i,j}$ – источниковый член, $m_{i,j}^{tr}$ – характеризует перенос компонента из одной фазы в другую.

При этом принимается допущение, что фазы находятся в равновесии на границе раздела фаз, а движущей силой процесса испарения является диффузия частиц. Фазовое равновесие описывается по закону Рауля [Saufi et al., 2019; Yang et al., 2021].

Скорость испарения k -го компонента определяется по формуле:

$$\dot{m}_k = -\rho_v D_{v,k} \left(\frac{\partial Y_{v,k}}{\partial n} \right) \Big|_S \frac{1}{1 - Y_{v,k}^S}, \quad (2)$$

где ρ_v – плотность паровой фазы, $D_{v,k}$ – коэффициент диффузии, $Y_{v,k}$ – массовая доля k -го компонента в паровой фазе. Индекс S означает принадлежность к поверхности границы раздела фаз.

Выражение (2) применимо только при испарении одного компонента смеси, тогда как для моделирования испарения нескольких компонентов требуется применять более сложные модели [Strotos et al., 2016]. Ввиду достаточной точности получаемых результатов моделирования при рассмотрении вопроса испарения природного газа ограничились испарением только одного компонента – метана.

Численное исследование процессов тепломассообмена в системе хранения сжиженного природного газа

Рассмотрен пример проведения расчета распределения температуры и давления в процессе бездренажного хранения сжиженного природного газа. Ключевые этапы расчетного исследования приведены на рис. 3. Разработка дискретных моделей и вычисления проводились в программном комплексе CFD-моделирования STAR CCM+ 2022.1. Исходная геометрическая модель представлена на рис. 4. Диаметр расчетной области соответствует диаметру внутреннего сосуда (без стенок) стандартного мультимодального танк-контейнера для СПГ. Ввиду отсутствия на практике значительных градиентов скорости в осевом направлении сосуда (ось Z), для упрощения постановки задачи и экономии вычислительных ресурсов расчетная область выполнена квазидвумерной.

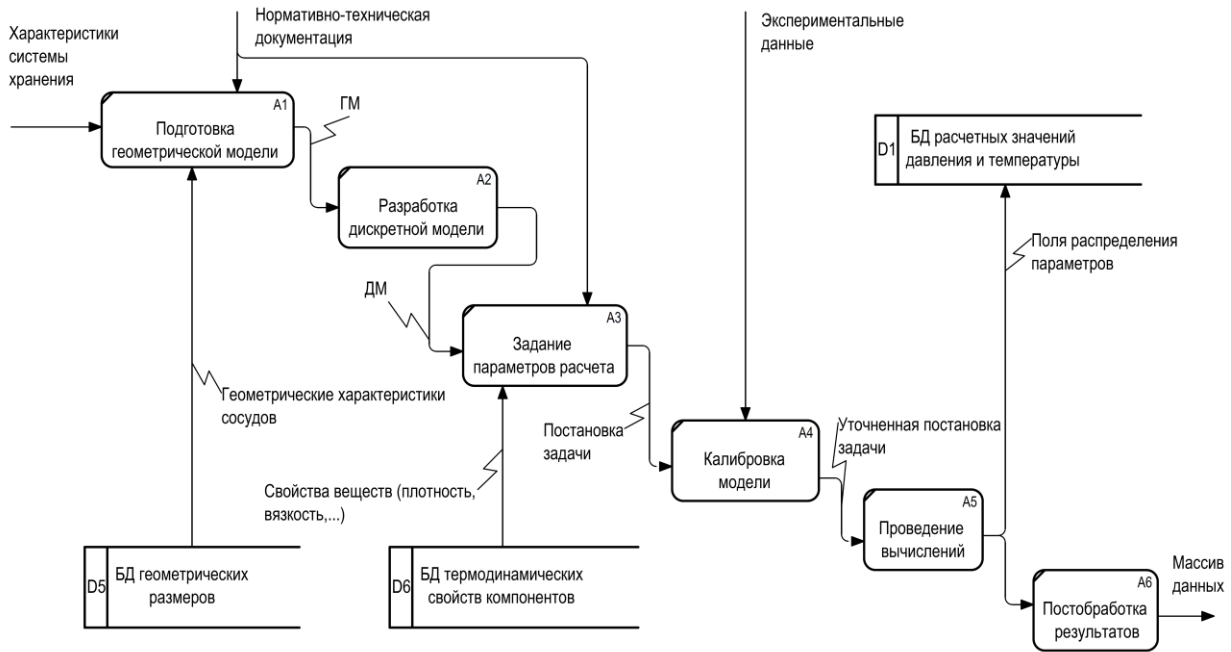


Рис. 3. Диаграмма информационных потоков при CFD-моделировании теплофизических процессов в криогенных сосудах

(БД – база данных; ГМ – геометрическая модель; ДМ – дискретная модель)

Fig. 3. Diagram of information flows during CFD modeling of thermophysical processes in cryogenic tank (DB – database; GM – geometric model; DM – discrete model)

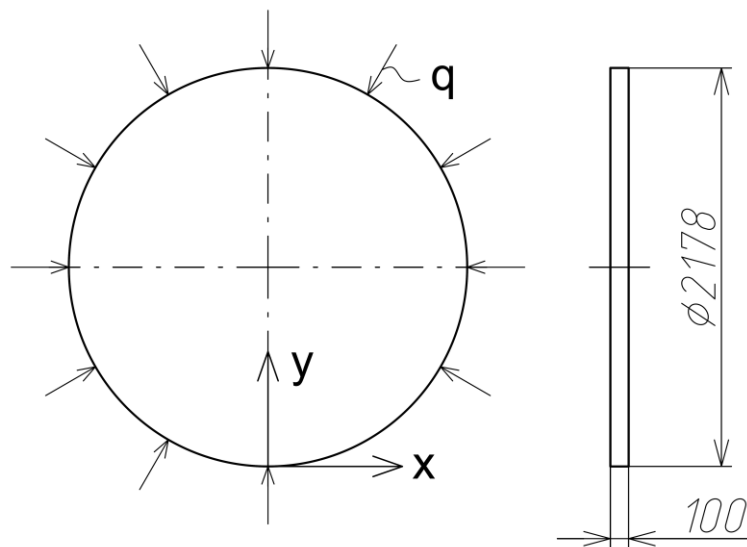


Рис. 4. Параметры геометрической модели

(x, y – направления координатных осей, q – тепловой поток к продукту через стенку)

Fig. 4. Parameters of geometric model

(x, y – directions of coordinate axes, q – heat flow to the product through the wall)

На рисунках 5 и 6 приведены примеры дискретных моделей, разработанных и использованных при проведении вычислений. Исследование проводилось на декартовых отсечных сетках, а также на полиэдральной расчетной сетке.

Исходными данными при задании граничных условий являлись данные о нормативных значениях теплопритока через изоляцию, указанные изготовителем сосудов в технической документации.

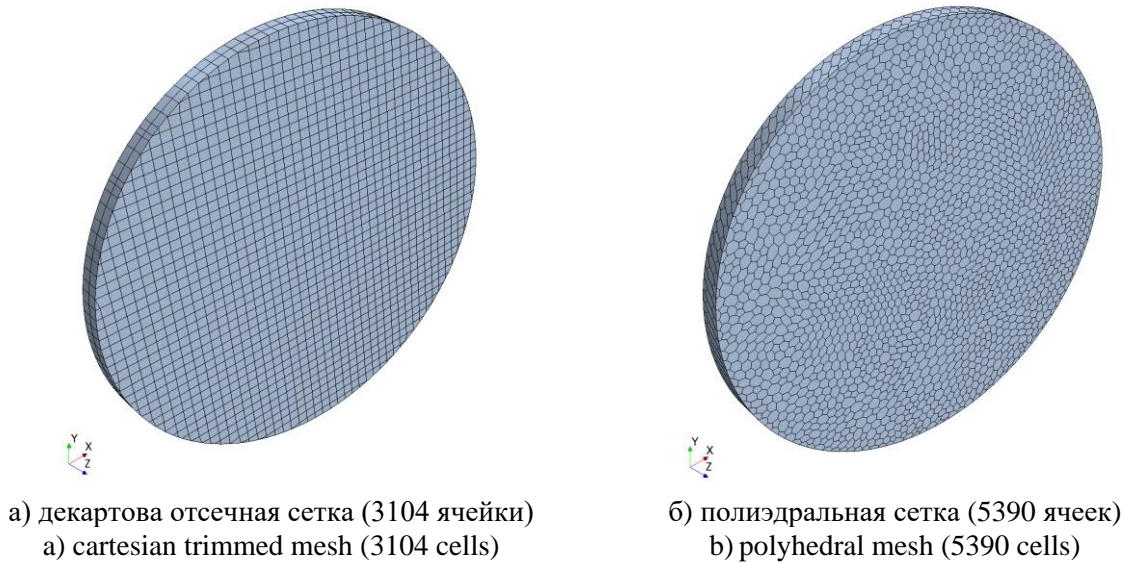


Рис. 5. Дискретные модели малой размерности
Fig. 5. Low-dimensional discrete models

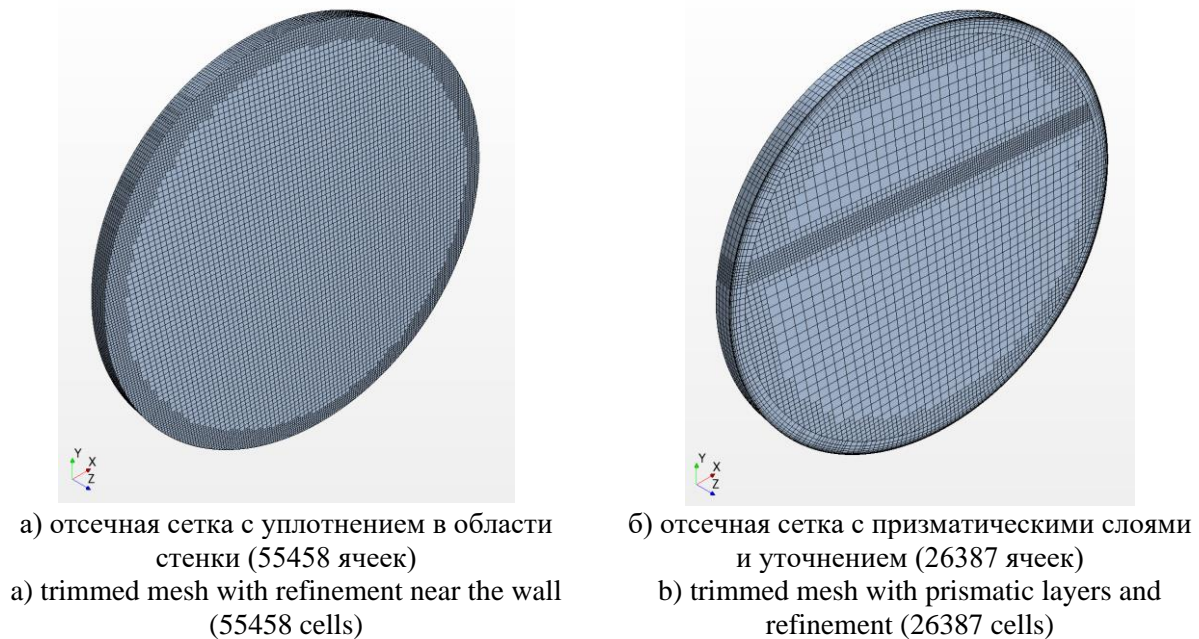


Рис. 6. Дискретные модели повышенной размерности
Fig. 6. High-dimensional discrete models

Также отдельно рассматривались случаи ухудшения условий теплоизоляции, которые неизбежно возникают с течением времени в любой системе хранения с вакуумной теплоизоляцией. В частности, нормативными значениями для танк-контейнеров с экранно-вакуумной теплоизоляцией можно считать значения удельного теплового потока через изоляцию $1...5 \text{ Вт/м}^2$, значения $6...10 \text{ Вт/м}^2$ соответствуют повышенным значениям, $>10 \text{ Вт/м}^2$ – существенная потеря вакуума и аварийные режимы эксплуатации.

Калибровочные расчеты для настройки модели испарения-конденсации при различных значениях удельного теплового потока к продукту через стенку необходимо проводить на дискретных моделях со сгущением сетки в области границы раздела фаз. Также могут быть использованы универсальные встроенные алгоритмы адаптивного уточнения сетки (Adaptive Mesh Refinement). Для предварительной оценки в первом

приближении температурного расслоения продукта при заданном значении теплового потока через стенку сосуда может использоваться постановка задачи с естественной конвекцией без подключения модели испарения-конденсации. При вычислениях используется модель турбулентности $k-\varepsilon$, хорошо зарекомендовавшая себя при расчетах течений в замкнутых объемах, где необходим учет естественной конвекции и сжимаемости среды [Солдатов, 2019].

На рис. 7 продемонстрировано влияние естественной конвекции на температурное расслоение в жидкой фазе. Наблюдается движение нагретой жидкости вверх вдоль боковых стенок сосуда и далее, вдоль поверхности раздела фаз «жидкость-пар». На поверхности раздела жидкость течет по направлению к центру сосуда, смешиваясь с более холодной жидкостью. В результате конвективного движения в верхней части сосуда образуется слой жидкости, в котором имеется существенный градиент температуры по высоте.

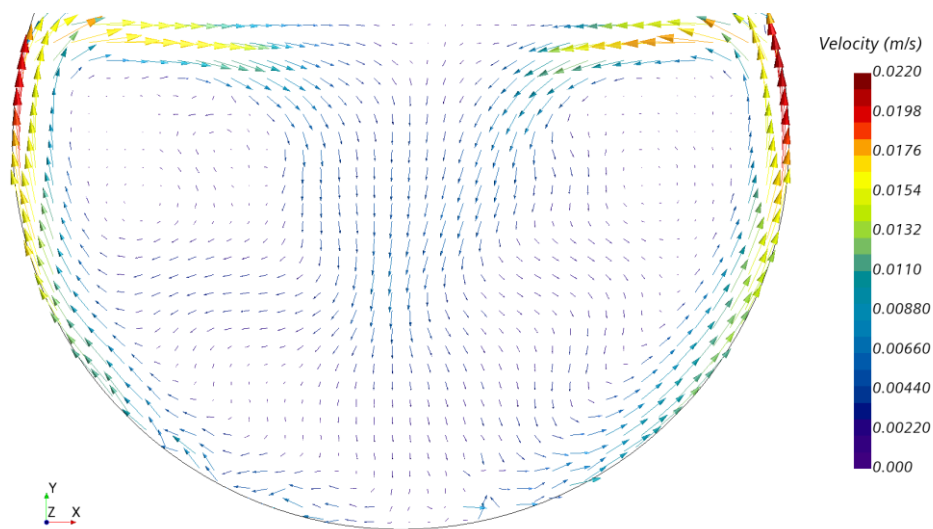


Рис. 7. Векторное поле скорости в жидкой фазе продукта
Fig. 7. Velocity vector field for liquid phase of the product

На рисунке 8 представлены типовые поля распределения давления и температуры в паровой и жидкой фазе продукта в процессе бездренажного хранения.

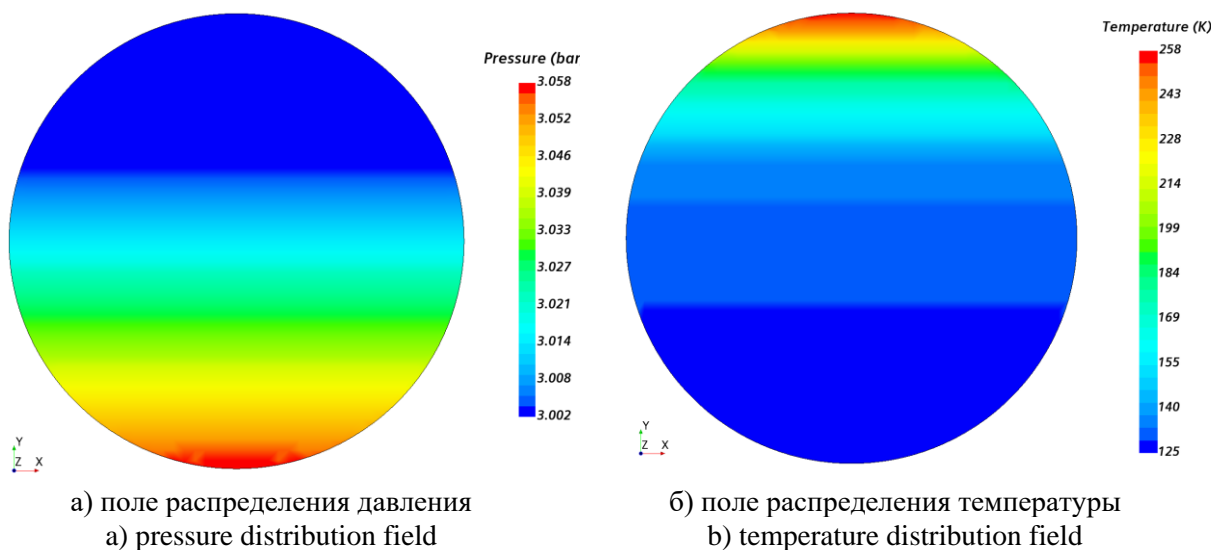


Рис. 8. Распределение параметров продукта в процессе хранения
Fig. 8. Distribution of product parameters during storage

На рисунке 9 представлены графики изменения давления в сосуде с течением времени при различных значениях уровня жидкости в сосуде. Как видно из результатов исследования, темп роста давления при заполнении сосуда жидкостью на 35 % превышает темп роста давления при уровне заполнения сосуда на 70 %, что учитывается при формировании массива результатов моделирования за счет приведения в соответствие каждому значению давления p_k и уровня жидкости L_k соответствующего значения времени хранения:

$$\tau_k \leftrightarrow \{p_k, L_k\}.$$

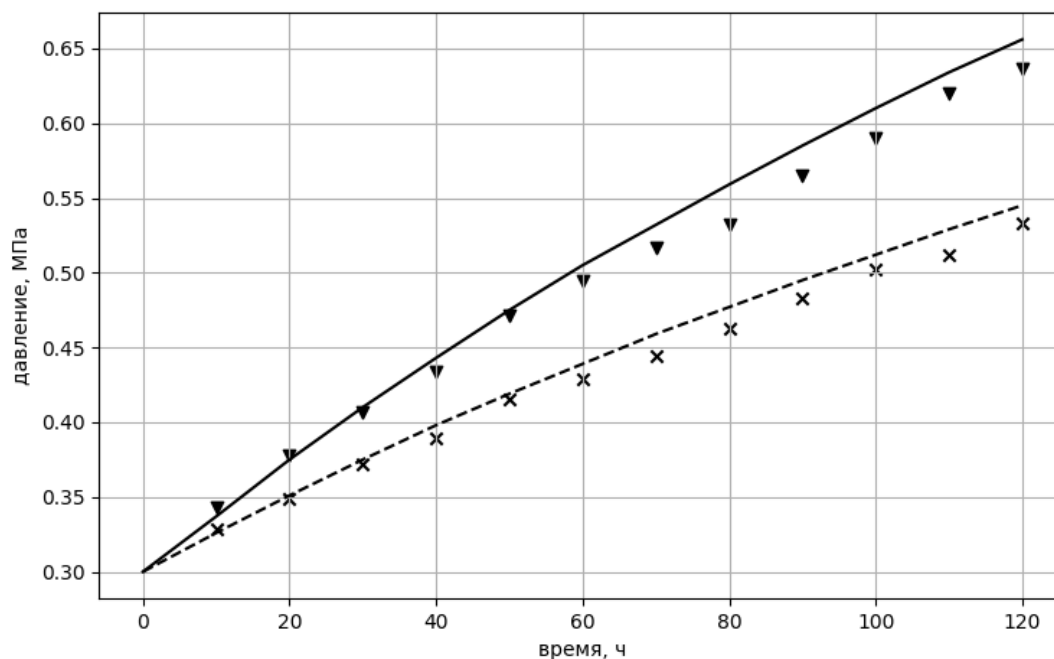


Рис. 9. Изменение давления в сосуде с течением времени
 (— расчет, уровень жидкости 35 %; --- расчет, уровень жидкости 70 %;
 ▼ эксперимент, уровень жидкости 35 %; × эксперимент, уровень жидкости 70 %)

Fig. 9. Tank pressure changes over time
 (— calculation, liquid level 35 %; --- calculation, liquid level 70 %.
 ▼ experiment, liquid level 35 %; × experiment, liquid level 70 %)

Заключение

Полученные картины течения согласуются с опытными данными и позволяют судить о правильности оценки температурного расслоения в сосуде, напрямую влияющего на темп роста давления.

Таким образом, использование предложенной функциональной модели мониторинга состояния криогенных систем хранения обеспечивает предоставление в режиме реального времени ответственным лицам текущей информации по параметрам бездренажного хранения криопродукта. Это позволяет своевременно принять превентивные меры по предотвращению потерь продукта в процессе хранения, а также не допустить возникновения взрывопожароопасной ситуации.

Внедрение в перспективе системы мониторинга в рамках определенного промышленного кластера, содержащего от нескольких десятков до нескольких сотен криогенных сосудов различного типа, позволит существенно повысить безопасность и эффективность производственных процессов.

Список литературы

- Архаров И.А. 2023. О необходимости возрождения криогенного машиностроения в России. Вестник Международной академии холода. № 1. С. 6–9.
- Исмагилова В.С., Чекушина Т.В. 2023. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков. Науки о Земле и недропользование. Т. 46. № 1 (82). С. 61–71. DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71.
- Павлова О.Ю., Чекардовский С.М. 2022. Современные технологии и оборудование транспорта сжиженного природного газа в Российской Федерации. В сборнике: Нефтегазовый терминал. Материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень. С. 108–113.
- Ряжских В.И., Сумин В.А., Хвостов А.А., Журавлев А.А., Семенихин О.А. 2020. Численное моделирование термоконцентрационной конвекции в криогенных резервуарах. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-2020. Т. 5. С. 17–20.
- 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). С. 485–495. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.
- Barsi S., Kassemi. M. 2008. Numerical and experimental comparisons of the self-pressurization behavior of an LH2 tank in normal gravity. Cryogenics 48(3): 122–129. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2008.01.003.
- Bo W., Ruoyin L., Hong C., et al. 2021. Characterization and Monitoring of Vacuum Pressure of Tank Containers with Multilayer Insulation for Cryogenic Clean Fuels Storage and Transportation. Applied Thermal Engineering. 187: 116569.
- Chen L., Ai B., Chen S., Liang G. 2016. Simulation of Self-Pressurization in Cryogenic Propellant Tank. 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics: 1068-1073.
- Huerta, F., Vesovic, V. 2021. CFD modelling of the isobaric evaporation of cryogenic liquids in storage tanks. International Journal of Heat and Mass Transfer, 176, 121419. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121419.
- Kang M., Kim J., You H., Chang. D. 2017. Experimental Investigation of Thermal Stratification in Cryogenic Tanks, Experimental Thermal and Fluid Science. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.017.
- Kartuzova O.V., Kassemi M., Umemura Y., Kinefuchi K., Himeno T. 2020. CFD Modeling of Phase Change and Pressure Drop during Violent Sloshing of Cryogenic Fluid in a Small-Scale Tank. AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. DOI: 10.2514/6.2020-3794.
- Lee D.-Y., Jo J.-S., Nyongesa A.J., Lee W.-J. 2023. Fatigue Analysis of a 40 ft LNG ISO Tank Container. Materials 2023, 16, 428. DOI: 10.3390/ma16010428.
- Saufi A., Calabria R., Chiariello F., Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Massoli P. 2019. An experimental and CFD modeling study of suspended droplets evaporation in buoyancy driven convection. Chemical Engineering Journal, 375, 122006. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122006.
- Schlottke J., Weigand B. 2008. Direct numerical simulation of evaporating droplets. Journal of Computational Physics, 227(10): 5215–5237. DOI:10.1016/j.jcp.2008.01.042.
- Soldatov E., Bogomolov A. 2021. Decision Support Models and Algorithms for Remote Monitoring of the Equipment State. CEUR Workshop Proceedings. Сер. "ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems"" : 1–8.
- Strotos G., Malgarinos I., Nikolopoulos, N., Gavaises, M. 2016. Predicting the evaporation rate of stationary droplets with the VOF methodology for a wide range of ambient temperature conditions. International Journal of Thermal Sciences, 109: 253–262. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.022.
- Soldatov E., Bogomolov A. 2022. Issues of energy-efficient storage of fuel in multimodal transport units. Smart Innovation, Systems and Technologies, 232: 393–402. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_34
- Yang W., Xia J., Wang X.Y., Wan K.D., Megaritis A., Zhao H. 2021. Predicting evaporation dynamics of a multicomponent gasoline/ethanol droplet and spray using non-ideal vapour-liquid equilibrium models. International Journal of Heat and Mass Transfer, 168, 120876. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120876.

References

- Arkharov I.A. 2023. On the need of the revival cryogenic engineering in Russia. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. No. 1: 6–9. (in Russian)
- Ismagilova V.S., Chekushina T.V. 2023. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons. *Earth sciences and subsoil use*. Vol. 46. No. 1 (82): 61–71. (in Russian). DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71.
- Pavlova O.Yu., Chekardovsky S.M. 2022. Modern technologies and equipment for the transport of liquefied natural gas in the Russian Federation. In: *Oil and gas terminal. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Tyumen: 108–113. (in Russian).
- Ryazhskikh V.I., Sumin V.A., Khvostov A.A., Zhuravlev A.A., Semenikhin O.A. 2020. Numerical simulation of thermoconcentration convection in cryogenic tanks. *Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-2020*. Vol. 5: 17–20. (in Russian).
- 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). DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.
- Barsi S., Kassemi. M. 2008. Numerical and experimental comparisons of the self-pressurization behavior of an LH2 tank in normal gravity. *Cryogenics* 48(3): 122–129. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2008.01.003.
- Bo W., Ruoyin L., Hong C., et al. 2021. Characterization and Monitoring of Vacuum Pressure of Tank Containers with Multilayer Insulation for Cryogenic Clean Fuels Storage and Transportation. *Applied Thermal Engineering*. 187: 116569.
- Chen L., Ai B., Chen S., Liang G. 2016. Simulation of Self-Pressurization in Cryogenic Propellant Tank. *12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*: 1068-1073.
- Huerta F., Vesovic V. 2021. CFD modelling of the isobaric evaporation of cryogenic liquids in storage tanks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 176, 121419. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121419.
- Kang M., Kim J., You H., Chang. D. 2017. Experimental Investigation of Thermal Stratification in Cryogenic Tanks, *Experimental Thermal and Fluid Science*. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.12.017.
- Kartuzova O.V., Kassemi M., Umemura Y., Kinefuchi K., Himeno T. 2020. CFD Modeling of Phase Change and Pressure Drop during Violent Sloshing of Cryogenic Fluid in a Small-Scale Tank. *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*. DOI: 10.2514/6.2020-3794.
- Lee D.-Y., Jo J.-S., Nyongesa A.J., Lee W.-J. 2023. Fatigue Analysis of a 40 ft LNG ISO Tank Container. *Materials* 2023, 16, 428. DOI: 10.3390/ma16010428.
- Saufi A., Calabria R., Chiariello F., Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Massoli P. 2019. An experimental and CFD modeling study of suspended droplets evaporation in buoyancy driven convection. *Chemical Engineering Journal*, 375, 122006. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122006.
- Schlottke J., Weigand B. 2008. Direct numerical simulation of evaporating droplets. *Journal of Computational Physics*, 227(10): 5215–5237. DOI:10.1016/j.jcp.2008.01.042.
- Soldatov E., Bogomolov A. 2021. Decision Support Models and Algorithms for Remote Monitoring of the Equipment State. *CEUR Workshop Proceedings*. Сер. "ITIDMS 2021 – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems"": 1-8.
- Strotos G., Malgarinos I., Nikolopoulos N., Gavaises M. 2016. Predicting the evaporation rate of stationary droplets with the VOF methodology for a wide range of ambient temperature conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 109: 253–262. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.022.
- Soldatov E., Bogomolov A. 2022. Issues of energy-efficient storage of fuel in multimodal transport units. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 232: 393–402. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_34
- Yang W., Xia J., Wang X.Y., Wan K.D., Megaritis A., Zhao H. 2021. Predicting evaporation dynamics of a multicomponent gasoline/ethanol droplet and spray using non-ideal vapour-liquid equilibrium models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120876. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120876.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.



Поступила в редакцию 20.09.2023

Received September 20, 2023

Поступила после рецензирования 15.02.2024

Revised February 15, 2024

Принята к публикации 29.02.2024

Accepted February 29, 2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Солдатов Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Evgeny S. Soldatov, Candidate of Technical Sciences, researcher at Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia