



УДК 004.942

DOI 10.52575/2712-746X-2023-50-4-893-900

Алгоритмы обработки информации в задачах контроля и прогнозирования состояния криогенного оборудования

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. В статье рассмотрены вопросы сбора, обработки и передачи информации при дистанционном контроле состояния стационарного и транспортного криогенного оборудования, применяемого для длительного хранения криогенных продуктов. Изложено решение задачи превентивного информирования диспетчерских служб и эксплуатирующей организации о наличии технической неисправности криогенного сосуда, которая приводит к увеличению давления вакуума в теплоизоляционной полости, что обуславливает повышенный теплоприток из окружающей среды и существенное изменение давления во внутреннем сосуде с течением времени. Представлена структура информационной системы мониторинга состояния криогенного оборудования и приведено описание вычислительного алгоритма расчета оценки технического состояния экранно-вакуумной теплоизоляции криогенного сосуда по отклонению темпа роста давления, а также алгоритма расчета оценки времени бездренажного хранения с учетом изменения давления вакуума в теплоизоляционной полости.

Ключевые слова: вычислительный алгоритм, криогенное оборудование, мониторинг оборудования, дистанционный мониторинг, бездренажное хранение, экранно-вакуумная теплоизоляция, тепломассообмен

Для цитирования: Солдатов Е.С. 2023. Алгоритмы обработки информации в задачах контроля и прогнозирования состояния криогенного оборудования. Экономика. Информатика, 50(4): 893–900. DOI: 10.52575/2712-746X-2023-50-4-893-900

Information Processing Algorithms in Tasks of Monitoring and Predicting the State of Cryogenic Equipment

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 article discusses the issues of collecting, processing and transmitting information during remote monitoring of the condition of stationary and transport cryogenic equipment used for long-term storage of cryogenic products. A solution to the problem of preventive informing dispatch services and the operating organization about the presence of a technical malfunction of a cryogenic vessel is outlined, which leads to an increase in vacuum pressure in the thermal insulation cavity, causing an increased heat flow from the environment and a significant change in pressure in the internal vessel over time. The structure of the information system for monitoring the condition of cryogenic equipment is presented. The article also gives a description of the computational algorithm for calculating the assessment of the technical condition of the screen-vacuum thermal insulation of a cryogenic vessel based on the deviation of the pressure growth rate, as well as the algorithm for calculating the assessment of the time of drainless storage taking into account changes in vacuum pressure in the heat-insulating cavity.

Keywords: computational algorithm, cryogenic equipment, equipment monitoring, remote monitoring, drainless storage, screen-vacuum thermal insulation, heat and mass transfer

For citation: Soldatov E.S. 2023. Information Processing Algorithms in Tasks of Monitoring and Predicting the State of Cryogenic Equipment. Economics. Information technologies, 50(4): 893–900 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-746X-2023-50-4-893-900

Введение

При длительном хранении криогенных продуктов (жидкого кислорода, жидкого азота, сжиженного природного газа, жидкого водорода и др.) с закрытым клапаном газосброса (бездренажное хранение) теплопритоки через вакуумную теплоизоляцию приводят к испарению части продукта и росту давления в сосуде любого типа: резервуаре, цистерне, топливном баке и др. Проблема усугубляется в том случае, когда по различным причинам продолжительное время отсутствует отбор из криогенных сосудов жидкого продукта на нужды потребителя, в частности, когда отсутствие отбора обусловлено потребностью длительного хранения топлива на предприятиях [Chen et al., 2016; Ряжских и др., 2020]. Как правило, это приводит к потерям продукта после достижения максимально допустимого рабочего давления в сосуде вследствие автоматического сброса газа в атмосферу через предохранительные клапаны. При этом уровень потерь криогенного продукта напрямую связан с техническим состоянием сосуда, главным образом, с величиной давления вакуума в теплоизоляционной полости резервуара, цистерны или топливного бака. Утечки паров горючих газов также приводят к образованию в воздухе рабочей зоны взрывоопасного облака, которое трудно поддается рассеиванию из-за активной конденсации атмосферной влаги, что обуславливает повышенные риски возникновения взрывопожароопасной ситуации [Kang et al., 2017; Ustolina et al., 2022].

Проведение диагностики теплоизоляции криогенного сосуда является затруднительным действием из-за отсутствия в большинстве случаев стационарных датчиков давления вакуума. Это обуславливает необходимость остановки сосуда и временного вывода его из эксплуатации для оценивания состояния теплоизоляции [Vo et al., 2021; Lee et al., 2023]. При этом, получить оценку технического состояния сосуда можно и косвенными методами, например, путем вычисления темпа роста давления, который в общем случае имеет нелинейный характер. В этом случае целесообразным является применение цифровых двойников криогенной системы хранения (СХ), в которых используются базы данных результатов компьютерного моделирования процессов бездренажного хранения различных криогенных продуктов [Short, Twiddle, 2019; Mourtzis et al., 2020; Lee et al., 2022; Balyk et al., 2023]. Однако точное прогнозирование времени хранения криогенного продукта в СХ при помощи моделирования представляет собой сложную задачу, решение которой для всего спектра вероятных термодинамических состояний продукта пока не представляется возможным [Huerta et al., 2021]. Поэтому для расчета оценки времени бездренажного хранения продукта с достаточной для практических целей точностью целесообразно применение эвристических вычислительных алгоритмов [Солдатов, 2019; Soldatov, Bogomolov, 2021].

Информационная система мониторинга состояния криогенного оборудования

Базовой задачей информационного взаимодействия в связке «система хранения – цифровой двойник» является обеспечение удаленного мониторинга состояния криогенного оборудования, в том числе с возможностью на основе результатов компьютерного моделирования вычислять резервное время бездренажного хранения продукта для каждой конкретной системы хранения [Strotos et al., 2016; Saufi et al., 2019; Kartuzova et al., 2020; Tobin et al., 2022].

Структурная схема, показывающая взаимосвязь программных средств при решении задач промышленного мониторинга состояния криогенных СХ, приведена на рисунке 1. Информация от датчиков и преобразователей направляется в модуль телеметрии. За счет наличия у каждой из СХ, состояние которой контролируется в режиме реального времени, индивидуального телеметрического модуля, в информационную систему мониторинга мо-

гут быть включены различные системы хранения, вне зависимости от объема криогенного хранилища или удаленности систем друг от друга [Larkin et al., 2023a; Larkin et al., 2021].

Сервер цифрового двойника (ЦД) системы хранения содержит вычислительный комплекс, где производится обработка информации, поступающей от модулей телеметрии каждой из подключенных к системе мониторинга стационарных и транспортных СХ. Ключевой информацией являются данные по давлению и уровню жидкого продукта. На информационной картине ЦД также отображается режим хранения в конкретный момент времени (стационарный или транспортный) и основной расчетный параметр – оценка резервного времени бездренажного хранения.

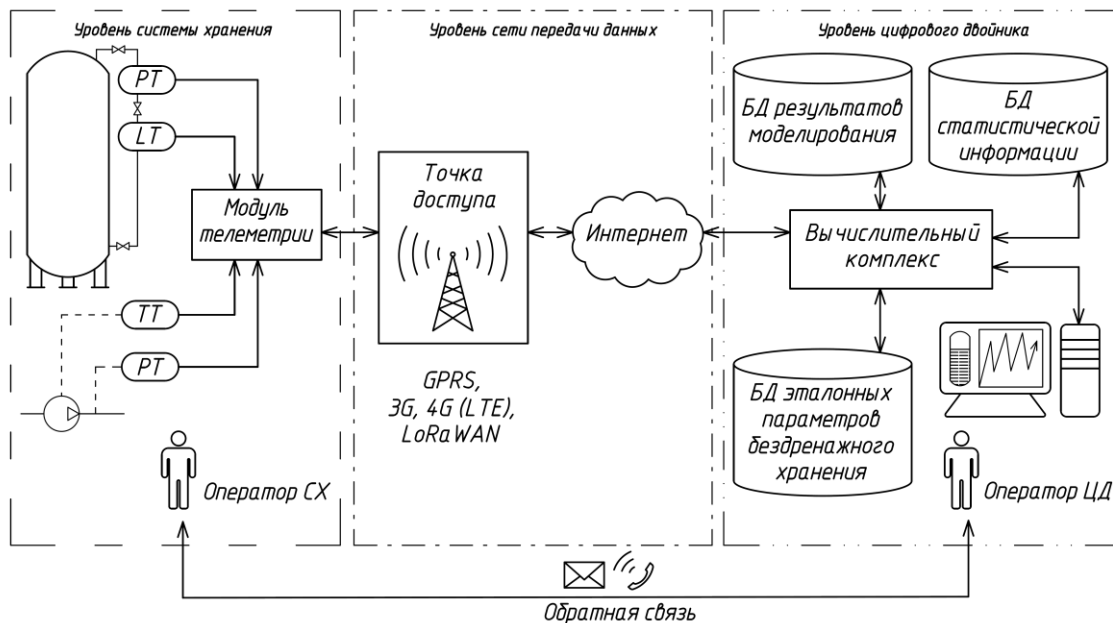


Рис. 1. Структура информационной системы мониторинга состояния криогенного оборудования (СХ – система хранения; БД – база данных; ЦД – цифровой двойник;

PT, LT, TT – преобразователи, соответственно, давления, уровня и температуры)

Fig. 1. Structure of the information system for monitoring the state of cryogenic equipment

(SS – storage system; DB – database; DT – digital twin;

PT, LT, TT – pressure, level and temperature converters, respectively)

Базой для вычисления прогнозируемой продолжительности бездренажного хранения являются массив данных по времени хранения, полученных по результатам компьютерного моделирования и помещенный в базу данных (БД) результатов моделирования. Текущая информация о процессе хранения дополнительно записывается в БД статистической информации, которая подлежит последующему анализу с целью уточнения прогноза по времени хранения для конкретной СХ.

Алгоритм расчета оценки текущего технического состояния криогенного сосуда

Для каждой СХ с вакуумной теплоизоляцией задаются дискретные значения уровня жидкости в сосуде и помещаются в массив данных

$$L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}$$

При этом в каждом случае значению уровня жидкости соответствует то или иное значение рабочего давления в сосуде:

$$\forall l_j \in L \exists P_j = \{p_1^j, p_2^j, p_3^j, \dots, p_l^j\}$$

Блок-схема алгоритма расчета оценки состояния теплоизоляции посредством вычисления отклонения темпа роста давления в цистерне от нормального значения приведена на рисунке 2. Получение информации от датчиков (преобразователей) давления и уровня производится в момент времени k .

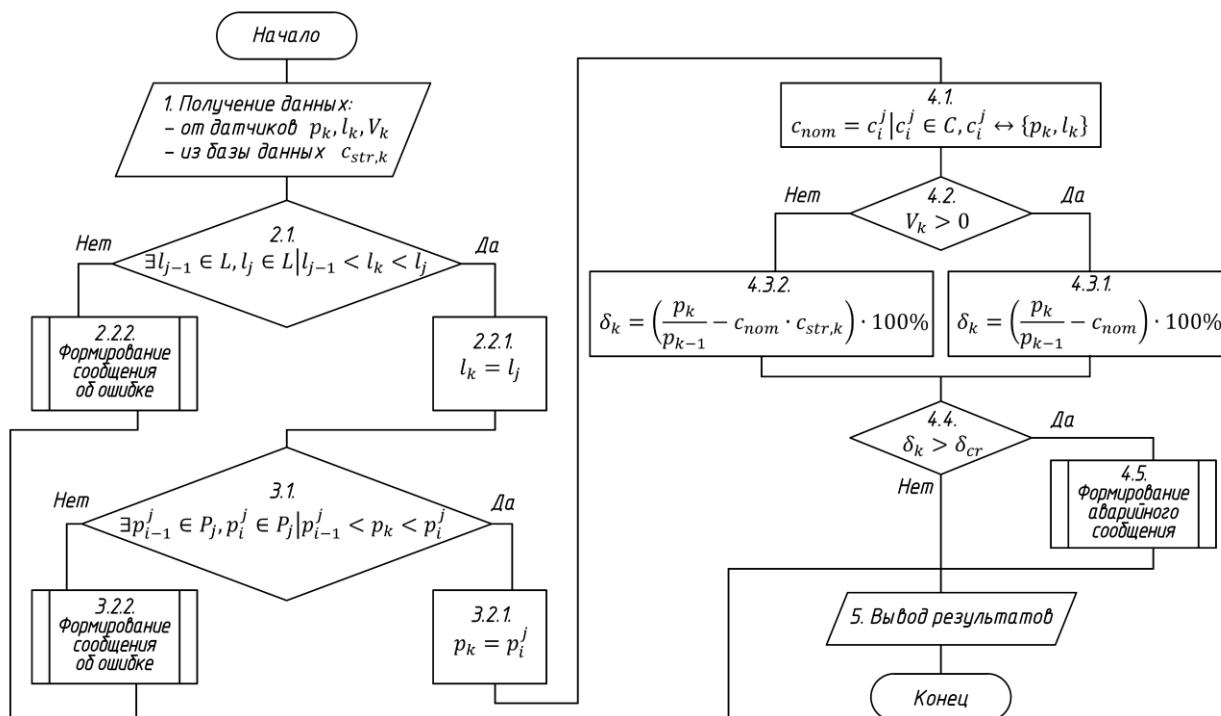


Рис. 2. Алгоритм расчета оценки текущего технического состояния сосуда по изменению темпа роста давления криопродукта
 Fig. 2. Algorithm for calculating the assessment of the current technical condition of the vessel by changing the pressure growth rate of the cryoprodukt

При этом в вычислительном модуле производится округление (в большую сторону) значений давления и уровня жидкости до ближайших значений из приведенных выше массивов, после чего однозначно определяется номинальное значение коэффициента роста давления c_{nom} для текущих измеренных (округленных) значений давления p_k и уровня жидкости l_k . Массив C номинальных значений коэффициента роста давления определен заранее методами компьютерного моделирования или статистическими методами и находится в блоке хранения данных.

Отклонение темпа роста давления от номинального значения в общем случае определяется по формуле:

$$\delta_k = \left(\frac{p_k}{p_{k-1}} - c_{nom} \cdot c_{str,k} \right) \cdot 100\%,$$

где p_k – текущее измеренное значение давления, p_{k-1} – предыдущее измеренное значение, $c_{str,k}$ – коэффициент, учитывающий степень температурного расслоения продукта. Он используется только при расчете в стационарном режиме хранения продукта и зависит от геометрических и эксплуатационных характеристик сосуда и в момент времени k загружается из блока хранения данных с результатами моделирования. Режим транспортировки (стационарный или транспортный) определяется в соответствии с информацией от модуля навигации по текущему значению скорости контейнера V_k .

При превышении значения отклонения темпа роста давления выше заданного критического значения δ_{cr} производится формирование и отправка аварийного сообщения на оператора ЦД. Получение аварийного сообщения сигнализирует о технической неисправ-

ности СХ, которая привела к существенному возрастанию давления вакуума в теплоизоляционной полости. При необходимости осуществляется информирование оператора СХ о существенном изменении технического состояния сосуда или оповещение водителя транспортного средства в случае с цистерной. Таким образом, появляется возможность принятия мер по предотвращению дальнейшего роста давления или по безопасному сбросу давления из криогенного сосуда.

Алгоритм расчета оценки резервного времени бездренажного хранения продукта в сосуде

Для криогенных сосудов, дополнительно оборудованных датчиком давления вакуума, может быть выполнен расчет в режиме реального времени бездренажного хранения продукта по измеренному значению давления вакуума в теплоизоляционной полости, другими словами, может быть решена обратная задача. Блок-схема алгоритма для вычисления текущей оценки резервного времени бездренажного хранения продукта в криогенном сосуде представлена на рис. 3.

В этом случае ключевой информацией является массив значений времени хранения U , также определенный заранее методами компьютерного моделирования или на основе обработки статистических данных [Soldatov, Bogomolov, 2021; Larkin et al., 2023b]. С учетом измеренного значения давления вакуума $p_{v,k}$, производится расчет дополнительного теплового потока, появляющегося за счет натекания газа в теплоизоляционную полость:

$$q_{\beta} = K_1 \cdot K_2 \cdot A_t \cdot p_{v,k} (T_k - T_{A,k}),$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий долю молекул газа, достигающих поверхности сосуда и обменивающихся тепловой энергией с поверхностью сосуда, K_2 – коэффициент, учитывающий термодинамические свойства газа, A_t – площадь поверхности сосуда, $T_{A,k}$ – температура поверхности сосуда, соответствующая измеренному значению давления в сосуде p_k , T_k – измеренное значение температуры окружающей среды.

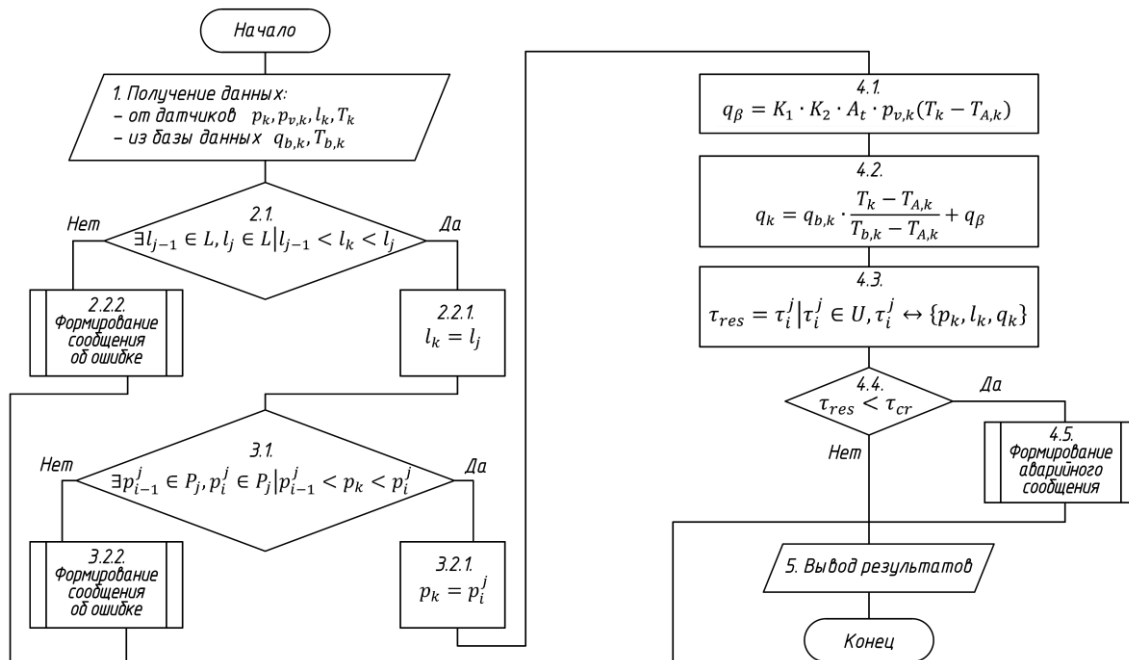


Рис. 3. Алгоритм расчета времени бездренажного хранения с учетом изменения давления вакуума в теплоизоляционной полости
 Fig. 3. Algorithm for calculating drainage-free storage time, taking into account changes in vacuum pressure in the thermal insulation cavity

Далее вычисляется тепловой поток из окружающей среды через изоляцию q_k , исходя из базового значения теплового потока для рассматриваемого сосуда $q_{b,k}$ (обычно указывается в технической документации на сосуд) и базового значения температуры окружающей среды $T_{b,k}$, при которой было посчитано или измерено значение базового (паспортного) теплопритока через изоляцию. Далее из массива данных U по времени хранения выбирается ближайшее по значению время хранения τ_{res} , соответствующее текущему значению теплопритока q_k . В случае, когда полученное значение резервного времени бездренажного хранения τ_{res} оказывается ниже заданного критического значения τ_{cr} , также производится формирование и отправка аварийного сообщения.

Заключение

Использование информационной системы дистанционного контроля и прогнозирования состояния криогенного емкостного оборудования обосновано растущими потребностями в технических газах, в том числе в жидком криогенном топливе, а также в возрастании требуемых сроков хранения запасов топлива на предприятиях. Разработанные эвристические вычислительные алгоритмы позволяют своевременно рассчитать оценку технического состояния теплоизоляции криогенного оборудования. Применение предложенных решений позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации криогенных сосудов различного типа за счет превентивного информирования об изменении технического состояния сосуда в процессе эксплуатации, что позволяет, в частности, предотвратить появление утечек и не допустить образование в воздухе взрывоопасных смесей.

Список литературы

- 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): 485–495. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.
- Balyk O., Zolotaeva M., Bogomolov A., Soldatov A. 2023. Cyber-physical test facility for certification of robotic unmanned aerial systems. Lecture Notes in Networks and Systems, 596 LNNS, 385–396. DOI: 10.1007/978-3-031-21435-6_33.
- Bo W., Ruoyin L., Hong C. 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.
- Larkin E., Akimenko T., Bogomolov A., Sharov, V. 2023a. Reliability of robot's controller software. Lecture Notes in Computer Science, 14214 LNAI, 289–299.
- Larkin E.V., Akimenko T.A., Bogomolov A.V. 2021. Modeling the reliability of the onboard equipment of a mobile robot. Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics, 21(3): 390–399. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399.
- Larkin E.V., Akimenko T.A., Bogomolov A.V. 2023b. The swarm hierarchical control system. Lecture Notes in Computer Science, 13968 LNCS, 30–39. DOI: 10.1007/978-3-031-36622-2_3.

- Lee S., Haskins C., Paltrinieri N. 2022. Digital Twin Concept for Risk Analysis of Oil Storage Tanks in Operations: a Systems Engineering Approach. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 90, pp. 157–162. DOI: 10.3303/CET2290027.
- 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.
- Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. 2020. Intelligent Predictive Maintenance and Remote Monitoring Framework for Industrial Equipment Based on Mixed Reality. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6. DOI: 10.3389/fmech.2020.578379.
- 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.
- Short M.; Twiddle J. 2019. An Industrial Digitalization Platform for Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Pumping Equipment. *Sensors*, 19, 3781. DOI: 10.3390/s19173781.
- Soldatov E., Bogomolov A. 2021. Decision Support Models and Algorithms for Remote Monitoring of the Equipment State. *CEUR Workshop Proceedings*. Cep. "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.
- Tobin D., Bogomolov A., Golosovskiy M. 2022. Model of organization of software testing for cyber-physical systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 418, 51–60. DOI: 10.1007/978-3-030-95120-7_5.
- Ustolina F., Scarponib G., Iannaccone T., Cozzanib V., Paltrinieri N. 2022. Cryogenic Hydrogen Storage Tanks Exposed to Fires: a CFD Study. *Chemical Engineering Transactions*, 90, 535–540. DOI: 10.3303/CET2290090.

References

- 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.
- Balyk, O., Zolotaeva, M., Bogomolov, A., Soldatov, A. 2023. Cyber-physical test facility for certification of robotic unmanned aerial systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 596 LNNS, 385–396. DOI: 10.1007/978-3-031-21435-6_33.
- Bo, W., Ruoyin, L., Hong, C. 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.
- Larkin, E., Akimenko, T., Bogomolov, A., Sharov, V. 2023a. Reliability of robot's controller software. *Lecture Notes in Computer Science*, 14214 LNAI, 289–299.

- Larkin, E.V., Akimenko, T.A., Bogomolov, A.V. 2021. Modeling the reliability of the onboard equipment of a mobile robot. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 21(3), 390–399. DOI: 10.18500/1816-9791-2021-21-3-390-399.
- Larkin, E.V., Akimenko, T.A., Bogomolov, A.V. 2023b. The swarm hierarchical control system. *Lecture Notes in Computer Science*, 13968 LNCS, 30–39. DOI: 10.1007/978-3-031-36622-2_3.
- Lee, S., Haskins, C., Paltrinieri, N. 2022. Digital Twin Concept for Risk Analysis of Oil Storage Tanks in Operations: a Systems Engineering Approach. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 90, pp. 157–162. DOI: 10.3303/CET2290027.
- 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.
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. 2020. Intelligent Predictive Maintenance and Remote Monitoring Framework for Industrial Equipment Based on Mixed Reality. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6. DOI: 10.3389/fmech.2020.578379.
- 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.
- Short, M., Twiddle, J. 2019. An Industrial Digitalization Platform for Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Pumping Equipment. *Sensors*, 19, 3781. DOI: 10.3390/s19173781.
- 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.
- Tobin, D., Bogomolov, A., Golosovskiy, M. 2022. Model of organization of software testing for cyber-physical systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 418, 51–60. DOI: 10.1007/978-3-030-95120-7_5.
- Ustolina, F., Scarponib, G., Iannaccone, T., Cozzanib, V., Paltrinieri, N. 2022. Cryogenic Hydrogen Storage Tanks Exposed to Fires: a CFD Study. *Chemical Engineering Transactions*, 90, 535–540. DOI: 10.3303/CET2290090.

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 04.10.2023

Received October 04, 2023

Поступила после рецензирования 20.11.2023

Revised November 20, 2023

Принята к публикации 01.12.2023

Accepted December 01, 2023

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, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia