

УДК 621.64

Прогнозирование параметров отпарного газа в криогенных резервуарах.

Часть 1. Методы моделирования

Канд. техн. наук А. В. ЗАЙЦЕВ¹, А. САФТЛИ²

¹zai_@inbox.ru, ²adhamsaftly1994@gmail.com

Университет ИТМО

В статье представлен обзор явлений, связанных с отпарным газом (boil-off gas, BOG) и его параметрами в случае хранения сжиженного природного газа. Приведена история развития методов моделирования, используемых для прогнозирования BOG, представлены вычислительные методы, применяемые в настоящее время в данной отрасли. Рассматриваются три основные категории методов моделирования, используемых для прогнозирования отпарного газа: 1 — термодинамические модели на основе взаимосвязей между температурой, давлением и фазовыми изменениями; 2 — динамические имитационные модели, включая вычислительную динамику жидкости и газа (computational fluid dynamics, CFD); 3 — программные средства моделирования процессов, такие как Aspen HYSYS, MATLAB, ANSYS и др. Динамические имитационные модели отличаются более высокой точностью и могут описывать сложное поведение системы, но при этом требуется подробная системная информация, а процесс моделирования отличается большими вычислительными затратами и длительным временем расчета, что подходит для фундаментальных исследований, где точность имеет решающее значение. Термодинамические модели работают быстрее, но могут быть менее точными в детальном прогнозировании поведения системы, особенно в изменчивых условиях. Они хорошо подходят для рутинных оперативных прогнозов или систем с более простыми конфигурациями. Обзор и детальный анализ применения этих подходов к моделированию, призван помочь исследователям и специалистам отрасли в выборе наиболее подходящих моделей, основанных на сложности системы, желаемом уровне точности и доступных вычислительных ресурсах, обеспечивая оптимальные решения задачи снижения потерь на BOG и повышения операционной эффективности хранилищ.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), отпарной газ (BOG), скорость испарения (BOR), криогенное хранилище, моделирование, вычислительная динамика жидкости и газа (CFD).

Информация о статье:

Поступила в редакцию 26.01.2025, одобрена после рецензирования 28.02.2025, принята к печати 04.03.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-35-41

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Зайцев А. В., Сафтли А. Прогнозирование параметров отпарного газа в криогенных резервуарах. Часть 1. Методы моделирования. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 1. С. 35–41. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-35-41

Prediction of parameters for boil-off gas in cryogenic tanks. Part 1. Modelling methods

Ph. D. A. V. ZAITSEV¹, A. SAFTLI²

¹zai_@inbox.ru, ²adhamsaftly1994@gmail.com

ITMO University

The paper presents an overview of phenomena related to boil-off gas (BOG) and its parameters in liquefied natural gas storage. The history of modelling methods used for BOG prediction is shown, and the computational methods currently used in the industry are presented. We discuss three main categories of modelling methods used for BOG prediction: 1 — thermodynamic models based on relationships between temperature, pressure, and phase changes; 2 — dynamic simulation models including computational fluid dynamics (CFD); 3 — process modelling software tools such as Aspen HYSYS, MATLAB, ANSYS, etc. Dynamic simulation models are more accurate and can describe complex system behaviour, but detailed system information is required and the modelling process is computationally expensive and time-consuming, which is suitable for fundamental research where accuracy is critical. Thermodynamic models are faster, but can be less accurate in predicting detailed system behaviour, especially under varying conditions. They are well suited for routine operational predictions or systems with simpler configurations. The review and detailed analysis of the application of these modelling approaches is intended to assist researchers and industry professionals in selecting the most appropriate models based on system complexity, desired level of accuracy, and available computational resources, providing optimal solutions for the task of reducing BOG losses and improving the operational efficiency of storage facilities.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), boil-off gas (BOG), boil-off rate (BOR), cryogenic storage, modelling, computational fluid and gas dynamics (CFD).

Article info:

Received 26/01/2025, approved after reviewing 28/02/2025, accepted 04/03/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-35-41

Article in Russian

For citation:

Zaitsev A. V., Saftli A. Prediction of parameters for boil-off gas in cryogenic tanks. Part 1. Modelling methods. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 1. p.35-41. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-35-41

Введение

Замена традиционных ископаемых видов топлива альтернативами с низким и нулевым содержанием углерода, такими как природный газ и водород, рассматривается как эффективный метод обезуглероживания глобального энергетического баланса и минимизации выбросов парниковых газов. Природный газ является наиболее энергоэффективным ископаемым топливом: при его сжигании и при производстве электроэнергии образуется на 45–65% меньше выбросов CO₂, чем при использовании угля, и на 25–30% меньше, чем при использовании нефти [1].

Сжиженный природный газ (СПГ) является наиболее экономичным средством транспортировки природного газа на большие расстояния, в том числе в максимальных объемах танкерами в места разгрузки на терминалах хранения.

Из-за вызванного кризисом Covid-19 замедления экономического роста в 2020 году произошло падение мирового спроса на газ на 4% по сравнению с ростом на 12,5% до 359 млн т в 2019 г. Несмотря на это, с 2021 по 2024 гг. спрос вырос на 1,5%. Согласно прогнозам, ожидается, что к 2040 г. долгосрочный спрос удвоится до 700 млн т, что укрепит уверенность в роли газа в формировании низкоуглеродной энергетической системы [2].

При выгрузке и хранении СПГ в зависимости от перепада температур между окружающей средой и СПГ и эффективности теплопередачи через конструктивные элементы резервуара определенная его часть переходит в газообразную фазу. Испарение части многокомпонентной жидкости, в свою очередь, приводит к изменению состава хранящегося СПГ и, как следствие, влияет на его термодинамические свойства и стоимостные показатели. Интенсификация процессов испарения может потенциально угрожать стабильности и безопасности процесса хранения СПГ и других технологических процессов. Испаряющийся СПГ, который называется отпарным газом (BOG), приводит к неизбежному повышению давления в резервуаре [3, 4].

При поддержании в резервуаре давления ниже максимально допустимого рабочего значения обычно применяют следующие технологии обработки BOG: непосредственный непрерывный сброс во внешнюю среду [5]; сжигание [6]; использование в качестве топлива для генераторов [6]; закачка в трубопроводы; повторное сжижение [7, 8]. Однако первые два метода сопряжены с экономическими и экологическими проблемами, в то время как производительность последних методов зависит от общего количества образующегося BOG.

Особую значимость прогнозирование параметров отпарного газа приобретает в связи с возможностью опасных инцидентов в результате неправильной организации технологических процессов. Далее приведены некоторые примеры.

СПГ в жидком состоянии не воспламеняется, но пары, образующиеся при выбросе или разливе, являются легковоспламеняющимися при концентрациях от 5% до 15%. Если СПГ разольется вблизи источника возгорания, испаряющийся газ может загореться над местом разлива, что приведет к возникновению «огненного бассейна», который будет распространяться по мере распространения разлива. Такой пожар является интенсивным, он разгорается гораздо сильнее и быстрее, чем возгорание сырой нефти или бензина, и его невозможно потушить, причем тепловое излучение при таком инциденте может ощущаться на расстоянии до 1,5 км от взрыва. Известны попытки стабилизации парообразования и роста давления в резервуарах для хранения СПГ с помощью систем управления на основе моделей прогнозирования [9, 10], однако остаются потенциальные риски аварий, такие как взрывы или пожары BOG в резервуарах для хранения и технологических системах.

В 1944 г. в Кливленде взорвался резервуар с объемом сжиженного газа, эквивалентным 2,5 млн м³ [5], что привело к самому масштабному пожару в истории города и создало невыносимую атмосферу, в результате которой погибли 130 человек и около 700 были вынуждены покинуть свои дома. Взорвался второй резервуар, вызвав волну пожара, которая в конечном итоге поглотила 217 автомобилей, 79 домов и два завода.

По данным публикации Саймона Ромеро в *The New York Times*, 12 февраля 2004 г. в результате одной из самых смертоносных катастроф за последние три десятилетия, связанных с СПГ, взрыв в 2004 г. сравнял с землей большую часть алжирского порта, погибли 30 человек и ранены были еще 70. Основной причиной аварии стало проектирование резервуара с отсутствием соответствующих мер по сбросу давления. Со временем во внутреннем резервуаре в процессе хранения образовались трещины, а непрерывное испарение сжиженного природного газа привело к чрезмерному повышению давления внутри резервуара, что в конечном итоге привело к разрыву внешнего резервуара.

В 1971 г. на станции хранения и распределения природного газа компании SNAM в La Spezia, Италия, произошла авария. Причиной аварии стали различия в плотности и температуре только что заправленного СПГ и хранящейся жидкости. Плотность и температура добав-

ленного СПГ была выше, что привело к дополнительному нагреву. Примерно в течение восемнадцати часов после заполнения хранилища из-за этих различий происходило быстрое испарение сжиженного природного газа, что привело к образованию значительного количества BOG. Как следствие, давление внутри резервуара быстро поднялось до 94,7 кПа, что привело к выбросу 181,44 тонны СПГ с высокой скоростью через предохранительные клапаны и другие выпускные отверстия [11, 12].

31 марта 2014 г. на предприятии в Плимуте произошел взрыв, который был настолько мощным, что куски металла весом более 900 кг были отброшены на расстояние более 400 м. Происшествие стало самой серьезной аварией со сжиженным газом в новейшей истории Америки.

За последние 10 лет только в США произошло 22 зарегистрированных инцидента со сжиженным газом, которые привели к повреждению имущества и соответствующим расходам. Таким образом, прогнозирование содержания BOG в резервуарах для хранения СПГ стало одной из самых важных задач, требующих решения. Кроме того, общие оценки количества образующегося отходящего газа полезны для мониторинга парникового эффекта и количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду [13], в том числе при сжигании отработанных газов в атмосфере [14], и выявления неопределенности в понимании общих экологических преимуществ замены дизельного топлива на СПГ в транспортном секторе.

Эффективное прогнозирование количества отпарного газа в резервуарах для хранения сжиженного природного газа имеет решающее значение в следующих случаях:

- оптимизация для повышения эффективности хранения;
- обеспечение эксплуатационной безопасности;
- обеспечение экономической целесообразности;
- определение сжигаемого количества BOG с целью контроля парникового эффекта и количества попадающих в окружающую среду загрязнений.

Для описания процессов обработки отпарного газа наряду с оценкой количества BOG, испаряющегося за единицу времени, используют относительную величину – скорость испарения BOR (boil-off rate) – количество образовавшегося газа на единицу емкости хранилища за заданный промежуток времени [15]. BOR служит важнейшим показателем для оценки эффективности изоляции резервуаров для хранения СПГ [16].

Цель и задачи исследования

Основной целью данного исследования является анализ методов и моделей прогнозирования отпарных газов при хранении СПГ в криогенных емкостях. Для этого следует решить ряд задач: по данным из большого количества информационных источников сформулировать положения классификации методов моделирования процессов при хранении СПГ; провести сравнение различных моделей по способу представления и обработки информации об объекте-оригинале и характеристикам процесса моделирования; проанализировать результаты моделирования, полученные различными авторами.

Методы моделирования для прогнозирования выбросов парниковых газов

Управление процессом образования BOG является ключом к минимизации потерь, обеспечению безопасности и оптимизации энергоэффективности [17, 18].

Для прогнозирования BOG были разработаны различные подходы к моделированию, которые учитывают несколько факторов, таких как поступление тепла, конструкция резервуара и условия эксплуатации [19]. Обычно их подразделяют на три основных типа – термодинамические модели [20, 21], динамические имитационные модели [22] и модели на основе программных систем [15].

Термодинамические модели используются для расчета испаряющегося газа в криогенных емкостях для хранения, в частности в резервуарах для сжиженного природного газа, и включают различные подходы к учету процессов теплопередачи и фазового перехода [23]. Ниже приведены некоторые ключевые положения, характерные для термодинамических моделей.

Основным принципом при создании термодинамической модели для оценки BOG является соблюдение баланса энергии [24]. В таких моделях энергетического баланса рассчитывается общее поступление тепла в систему и соответствующее количество испарившегося сжиженного природного газа. Этот метод учитывает удельную теплоемкость сжиженного природного газа, скрытую теплоту испарения и коэффициент теплопередачи. Общее количество тепла, поступающего в резервуар, рассчитывается с учетом теплопроводности через изоляцию, излучения из окружающей среды и конвекции от внешних источников (воздуха, воды) [25].

К преимуществам такого подхода по сравнению с динамическими имитационными моделями относятся:

- простота в реализации и понимании;
- небольшое время вычисления, позволяющее быстро оценить BOG в различных условиях;
- меньшие затраты на вычисления и экспертизу;
- возможность исследования широкого спектра сценариев с менее детализированными требованиями.

При этом к ограничениям можно отнести:

- точность вычислений может быть недостаточной при прогнозировании BOG в сложных и переходных условиях;
- зачастую метод основывается на эмпирических корреляциях и предположениях, которые могут быть справедливы не во всех случаях;
- метод не совсем подходит для учета переходных процессов и динамических взаимодействий внутри системы;
- метод дает менее детальное представление о пространственном и временном распределении BOG.

В стационарных термодинамических моделях предполагается, что система достигает установившегося состояния, при котором скорости поступления тепла и испарения постоянны [26]. При этом для оценки суточной скорости испарения СПГ используется постоянное значение BOR. Эта норма часто указывается производителями емкостей на основе эмпирических данных и стандартных условий и определяется как доля отпарного газа в процентах от общей массы СПГ в сутки.

Неотъемлемым правилом при использовании термодинамических моделей энергетического баланса при расчете испаряющегося газа в криогенных резервуарах для хранения является применение уравнения состояния (equation of state, EOS), поскольку EOS используется для определения термодинамических свойств, таких как давление, температура и удельный объем, используемых в уравнениях энергетического баланса [27].

Динамические имитационные модели применяют для более точного прогнозирования выбросов отпарных газов (BOG) в криогенных резервуарах, особенно в хранилищах для сжиженного природного газа. Эти модели учитывают переходные процессы и динамические изменения в системе, обеспечивая подробный и реалистичный прогноз уровня BOG [9].

Основной методикой при использовании такой модели является применение средств вычислительной динамики жидкости и газа (computational fluid dynamics, CFD), в результате которого получается информация с высокой точностью о распределении температуры, теплопередаче и характере течения внутри резервуара, что имеет решающее значение для точного прогнозирования BOG. Для создания такой модели требуется применение наиболее сложного математического аппарата [28]. Результаты детально учитывают поведение конвекционных потоков, температурные градиенты и фазовые переходы. В результате моделирования получается подробная информация о распределении температуры и, как следствие, о скорости испарения СПГ. CFD-модели особенно полезны для резервуаров сложной геометрии и различных условий эксплуатации. Эти модели могут учитывать такие сложные явления, как температурное расслоение, конвекционные потоки и локальный нагрев.

К преимуществам использования вычислительной динамики жидкости и газа относятся:

- обеспечение детального, пошагового анализа потока жидкости и теплопередачи внутри резервуара для сжиженного газа;
- возможность вычисления для сложных геометрических форм и схем течения, обеспечивая точное представление о поведении жидкости;
- эффективность при моделировании переходных процессов, отражающих динамику образования BOG с течением времени;
- высокая гибкость при создании конкретных сценариев и настройки моделей в соответствии с конкретными условиями.

Ограничениями для применения CFD являются:

- необходимость наличия значительных вычислительных ресурсов и времени, особенно для крупномасштабных систем;
- высокая сложность и в результате требование наличия специальных знаний для настройки и интерпретации результатов, что делает метод менее доступным для неспециалистов;
- требуемая вычислительная мощность и опыт могут привести к увеличению затрат.

Применение специализированного программного обеспечения, такого, как Aspen HYSYS, MATLAB и др., позволяет серьезно упростить процесс моделирования

при анализе состояния СПГ в хранилище и прогнозировать предельно допустимые параметры процесса образования отпарного газа [29]. С помощью таких расчетов можно исследовать различные сценарии и условия эксплуатации, чтобы получить полное представление о степени достижения предельных значений параметров. Изучаемые процессы могут включать нестационарную теплопередачу, фазовые переходы и механику жидкости и газа [30].

Преимущества применения специализированного программного обеспечения по сравнению с CFD:

- более удобный интерфейс, большая доступность для инженеров и операторов;
- способность интегрировать различные технологические объекты (интегрированные системы), обеспечивая целостное представление о процессе производства СПГ;
- возможность применения для оптимизации процессов, предоставляя инструменты для повышения эффективности и снижения затрат;
- уменьшение времени расчета для стационарных и простых динамических моделей.

При этом к ограничениям можно отнести:

- менее точное отражение динамики процессов;
- применение упрощающих предположений, ограничивающих точность в сложных сценариях;
- менее гибкий инструмент для моделирования специфических условий.

Необходимо отметить, что в широкой категории термодинамических моделей и динамических имитационных моделей применяется теория термодинамического равновесия [13, 27, 31, 32] и неравновесности [4, 33, 34].

Равновесная термодинамическая модель – это термодинамическая модель, разработанная на основе предположения, что изменения в паровой и жидкой фазах происходят достаточно медленно, чтобы гарантировать, что система достигнет состояния равновесия на каждом временном шаге [7].

Термодинамическое равновесие двухфазных систем достигается при равенстве температур, давлений и химических потенциалов фаз. Такие модели парожидкостного равновесия (vapor — liquid equilibrium, VLE) применяются для определения распределения компонентов между жидкой и парообразной фазами. Рассчитывается равновесный состав паровой и жидкой фаз на основе термодинамических свойств компонентов СПГ. Для описания фазового поведения используются уравнения состояния (Пенга–Робинсона, Соаве–Редлиха–Квонга и др.) [27, 35–37].

В неравновесных термодинамических моделях учитывается, что система не может мгновенно достичь равновесия и в резервуаре могут быть градиенты температуры, давления и изменение состава [4]. Такой подход предполагает переходный теплообмен, в котором учитывается динамический и нестационарный характер поступления тепла, когда со временем происходят изменения температуры и параметров фаз. Для описания скорости изменения температуры и массы в резервуаре используются дифференциальные уравнения. Сравнительная оценка показателей методов моделирования приведена в табл. 1.

Сравнение методов моделирования

Таблица 1

Table 1

Comparison of modelling methods

Характеристика	Динамическое моделирование (CFD)	Моделирование процесса (Aspen HYSYS, MATLAB и др.)	Термодинамические модели
Уровень детализации	Высокий (детальная гидродинамика)	Средний (интегрированный обзор процесса)	Низкий (упрощенная термодинамика)
Сложность	Высокая (требуется специальных знаний)	Средняя (удобна для пользователя)	Низкая (простота в реализации)
Время вычисления	Длительное (требуется больших вычислительных затрат)	Среднее (быстрее, чем CFD)	Короткое (быстрые вычисления)
Точность	Высокая (для сложных и переходных процессов)	Средняя (подходит для стационарной и простой динамики)	Переменная (зависит от допущений)
Стоимость	Высокая (затраты на вычисления и экспертизу)	Средняя (лицензирование программного обеспечения и экспертизы)	Низкая (минимальные затраты)
Гибкость приложений	Высокая (настраивается для конкретных сценариев)	Средняя (интегрированная, но менее гибкая)	Низкая (широкая, но менее подробная)
Соответствие вариантам использования	Детальный анализ конкретных сценариев	Оптимизация процессов и анализ стационарных состояний	Быстрые оценки и более простые сценарии

Заключение

В результате сравнительного анализа методов моделирования для прогнозирования количества парниковых газов можно сделать следующие рекомендации.

1. Динамические имитационные модели лучше всего подходят для детального и точного анализа BOG, особенно в сложных и переходных сценариях. Однако они требуют значительных вычислительных ресурсов и специальных знаний.

2. Программное обеспечение для моделирования процессов обеспечивает хороший баланс между детализацией и удобством использования, что делает его пригодным для оптимизации процессов и анализа стационарных состояний при умеренной сложности.

3. Термодинамические модели идеально подходят для быстрой и экономичной оценки состояния BOG в более простых сценариях, хотя в сложных и динамичных условиях им может не хватать точности.

Выбор правильного метода моделирования зависит от конкретных требований к анализу, имеющихся ресурсов и желаемого уровня детализации.

Во второй части данной работы будут рассмотрены результаты моделирования различными авторами процессов в паровой и жидкой фазах внутри резервуаров для хранения СПГ.

Литература/References

1. Saeid Mokhtab, William A. Poe, Gary Zatzman, M. R. Islam, Wim van Wassenhove, Ahmed Abdel Wahab. Handbook of natural gas transmission and processing second edition. The Boulevard, Langford Lane, Oxford, Kidlington, OX5 1GB, UK 2012, 802 p.

2. Shell R. D. Shell LNG Outlook 2020. [Electronic resource]: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook-2020.html#iframe=L3dIYmFwcHMvTE5HX29ldGxvb2sv>

3. Ainun Rahmania, Widodo W. Purwanto. 2020. Simulation of Boil-off Gas Effect along LNG Supply Chain on Quantity and Quality of Natural Gas. AIP Conf. Proc. 2223, 040004 (APRIL 06 2020). DOI: 10.1063/5.0000853.

4. Zhihao Wang, Amir Sharafian, Walter Mérida. Non-equilibrium thermodynamic model for liquefied natural gas storage tanks. *Energy*. Vol. 190, 1 January 2020, 116412. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116412

5. Djordje Dobrota, Branko Lalić, Ivan Komar. Problem of Boil-off in LNG Supply Chain. *Trans. Maritime Sci.* 02 (2013) 91–100.

6. George G. Dimopoulos, Christos A. Frangopoulos, A Dynamic. Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation. *Int. J. of Thermodynamics*. Vol. 11 (No. 3), pp. 123–131, September 2008.

7. Сафтли А., Зайцев А. В. Методика моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2024. Т. 10. № 2 (38). С. 25–44. [Softley A., Zaitsev A. V. Methodology of modeling processes in multi-component two-phase LNG systems. *Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, and energy*. 2024. Vol. 10. No. 2 (38). pp. 25–44. (in Russian)]

8. Harsha N. Rao, Khai H. Wong, Iftekhar A. Karimi. Minimizing Power Consumption Related to BOG Reliquefaction in an LNG Regasification Terminal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016, 55, 7431–7445. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b01341.

9. K. Shin, S. Son, J. Moon, Y. Jo, J.-S.-I. Kwon, S. Hwang. Dynamic modeling and predictive control of boil-off gas generation during LNG loading. *Comput. Chem. Eng.* 160 (2022) 107698.

10. Y.-P. Jo, M. S. F. Bangi, S.-H. Son, J.-S.-I. Kwon, S.-W. Hwang. Dynamic modeling and offset-free predictive control of LNG tank. *Fuel*. 285 (2021) 119074.

11. N. Chatterjee, J. Geist. Effects of stratification on boil-off rates in LNG tanks. *Pipeline Gas J.* 199 (1972).

12. A. Hubert, S. Dembele, P. Denissenko, J. Wen. Predicting liquefied natural gas (LNG) rollovers using computational fluid dynamics. *J. Loss Prev. Process Ind.* 62 (2019) 9.
13. Mohamad Shukri Zakaria, Kahar Osman, Ahmad Anas Yusof, Mohamad Hafidzal Mohd Hanafi, Mohd Noor Asril Saadun and Muhammad Zaidan Abdul Manaf. 2014. Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*. Vol. 6, pp. 845–853. DOI: 10.15282/jmes. 6.2014.10.0080.
14. M. S. Zakaria, K. Osman, M. N. A. Saadun, M. Z. A. Manaf, M. Hanafi, M. Hafidzal. Computational simulation of boil-off gas formation inside liquefied natural gas tank using evaporation model in ANSYS fluent. *Applied Mechanics and Materials*. 393:839–844 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM. 393.839.
15. Jeon GM, Park JC, Choi S. Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks. *Applied Thermal Engineering*. vol. 184 (9) 116264, 5 February 2021. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2020.116264.
16. Mohd Shariq Khan, Muhammad Abdul Qyyum, Wahid Ali, Aref Wazwaz, Khursheed B. Ansari and Moonyong Lee. Energy Saving through Efficient BOG Prediction and Impact of Static Boil-off-Rate in Full Containment-Type LNG Storage Tank. *Energies*. 2020, 13 (21), 5578. DOI: 10.3390/en13215578.
17. Zineb Bouabidi, Fares Almomani, Easa I. Al-musleh, Mary A. Katebah, Mohamed M. Hussein, Abdur Rahman Shazed, Iftekhhar A. Karimi, Hassan Alfadala. Study on Boil-off Gas (BOG) Minimization and Recovery Strategies from Actual Baseload LNG Export Terminal: Towards Sustainable LNG Chains. *Energies*. 2021, 14 (12), 3478. DOI: 10.3390/en14123478.
18. Miltiadis Kalikatzarakis, Gerasimos Theotokatos, Andrea Coraddu, Paul Sayan, Seng Yew Wong. Model based analysis of the boil-off gas management and control for LNG fuelled vessels. *Energy*. Vol. 251, 15 July 2022, 123872.
19. Dong-Ha Lee, Seung-Joo Cha, Jeong-Dae Kim, Jeong-Hyeon Kim, Seul-Kee Kim, Jae-Myung Lee. Practical Prediction of the Boil-Off Rate of Independent-Type Storage Tanks. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9 (1), 36. DOI: 10.3390/jmse9010036
20. Han Chen, Guang Yang, Jingyi Wu. A multi-zone thermodynamic model for predicting LNG ageing in large cryogenic tanks. *Energy*. 283 (2023) 128503. DOI: 10.1016/j. energy. 2023.128503.
21. Rizos N. Krikkis. A thermodynamic and heat transfer model for LNG ageing during ship transportation. Towards an efficient boil-off gas management. *Cryogenics*. 92 (2018) 76–83. DOI: 10.1016/j. cryogenics. 2018.04.007.
22. Yeonpyeong Jo, Kyeongseok Shin, Sungwon Hwang. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy. *Energy*. vol. 223, 15 May 2021, 120060. DOI: 10.1016/j. energy. 2021.120060.
23. Han Chen, Guang Yang, Jingyi Wu. A multi-zone thermodynamic model for predicting LNG ageing in large cryogenic tanks. *Energy*, volume 283, 15 November 2023. <https://doi.org/10.1016/j. energy. 2023.128503>.
24. Zhongdi Duan, Hongxiang Xue, Xueru Gong, Wenyong Tang. A thermal non-equilibrium model for predicting LNG boil-off in storage tanks incorporating the natural convection effect. *Energy*. 233 (2021) 121162. DOI: 10.1016/j. energy. 2021.121162
25. O. Khemis, Rachid Bessaïh, Rachid Bessaïh, M. Ait Ali, Maurice-Xavier François. Measurement of heat transfers in cryogenic tank with several configurations. October 2004. *Applied Thermal Engineering*. 24 (14-15):2233–2241. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2004.02.002.
26. Changhyun Kim, Taehoon Kim, Hwalong You, Minchang Kim, Yong-Shik Han, Byung-Il Choi, Kyu Hyung Do. A Simple Predictive Method for Estimating Boil-Off Rate Over Time in a Cryogenic Container. *J. Fluids Eng.* Jul 2024, 146 (7): 071110. DOI: 10.1115/1.4065220.
27. Ebenezer Adom, Sheikh Zahidul Islam and Xianda Ji. 2010. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2 (4), 292–296.
28. Saleem A., Farooq S., Karimi I. A., Banerjee R. A CFD simulation study of boiling mechanism and BOG generation in a full-scale LNG storage tank. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 115, 12 July 2018, P. 112–120. DOI: 10.1016/j. compchemeng. 2018.04.003.
29. Hasan M. M. F., Zheng A. M., Karimi I. A. 2009. Minimizing boil-off losses in liquefied natural gas transportation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 9571e9580. DOI: 10.1021/ie801975q.
30. Park C., Song K., Lee S., Lim Y., Han C. 2012. Retrofit design of a boil-off gas handling process in liquefied natural gas receiving terminals. *Energy*. 44, 69e78. DOI: 10.1016/j. energy. 2012.02.053.
31. Tomasz Włodek. Phase equilibria for liquefied natural gas (LNG) as a multicomponent mixture. *AGH Drilling, Oil, Gas*. Vol. 32, No. 3, 2015. DOI: 10.7494/drill. 2015.32.3.539.
32. Tomasz Włodek. Analysis of liquefied natural gas thermodynamic properties involving phase equilibria calculations. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 214 012105, June 2016. DOI: 10.5593/SGEM2016/B13/S06.092.
33. C. Migliore, A. Salehi, V. Vesovic. A non-equilibrium approach to modelling the weathering of stored Liquefied Natural Gas (LNG). *Energy*. 124 (2017) 684–692. DOI: 10.1016/j. energy. 2017.02.068.
34. Zhihao Wang. Thermal assessment of liquefied natural gas storage tanks. The faculty of graduate and postdoctoral studies (Mechanical Engineering), the university of British Columbia, (Vancouver), June 2021.
35. G. G. Dimopoulos, C. A. Frangopoulos. A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation. *International Journal of Thermodynamics*, 2008, vol. 11, pp. 123–131.
36. Stefania Moioli, Laura A. Pellegrini, Fabio Brignoli, Camilla Bellini. LNG Technology: The Weathering in Above-Ground Storage Tanks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. February 2014, 53 (10). DOI: 10.1021/ie404128d.
37. B. Hussain, M. Ahsan. A Numerical Comparison of Soave Redlich Kwong and Peng-Robinson Equations of State for Predicting Hydrocarbons Thermodynamic Properties. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. Vol. 8, Issue 1. P. 2422–2426. February 2018. DOI: 10.48084/etasr. 1644.

Сведения об авторах**Зайцев Андрей Викторович**

К. т. н., доцент Образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы»
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, zai_@inbox.ru

Сафтли Адхам

Инженер, аспирант Образовательного центра
«Энергоэффективные инженерные системы»
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, adhamsaftly1994@gmail.com

Information about authors**Zaitsev Andrey V.**

Ph. D., Associate professor of Educational Center
«Energy Efficient Engineering Systems»
of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,
Lomonosov str., 9, zai_@inbox.ru

Saftli Adham

Engineer, Graduate student of Educational Center
«Energy Efficient Engineering Systems»
of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,
Lomonosov str., 9, adhamsaftly1994@gmail.com



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

XIV международная научно-техническая конференция**КАЗАХСТАН – ХОЛОД 2025****29-30 апреля 2025 г.**

Международная научно-техническая конференция «Казахстан-Холод» – это мероприятие, посвященное вопросам развития холодильной техники и технологий. Она организована для обсуждения новейших тенденций и инноваций в сфере технологий хладоснабжения, экологически безопасных холодильных агентов, энергоэффективности в Казахстане. На конференции собираются специалисты, инженеры, ученые, представители промышленности, преподаватели и студенты для обмена знаниями, опытом и содействия развитию отрасли.

Основные научно-технические направления:

1. Инновационные технологии в теплофизике и технической физике.
2. Новые методы и процессы в холодильной технике и системах кондиционирования.
3. Теплоснабжение с применением энергоэффективных тепловых насосов.
4. Современные технологии и оборудование пищевой промышленности.
5. Эффективные системы автоматизации в холодильной технике и технологическом оборудовании.
6. Сокращение потребления хладагентов с высоким потенциалом глобального потепления в рамках Кигалийской поправки к Монреальскому протоколу.

Организаторы:

- ❖ Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби (КазНУ)
- ❖ Представительство Международной академии холода РК
- ❖ Ассоциация холодильной промышленности и кондиционирования воздуха РК
- ❖ Алматинский Технологический Университет
- ❖ ТОО «Тениз» – Школа холода автоматики и электроники

Место проведения:

Республика Казахстан, г. Алматы, КазНУ имени Аль-Фараби,
проспект Аль-Фараби 71/27 (корпус научной библиотеки)

Языки конференции: казахский, русский, английский

<https://maxteniz.kz/kazref2025/>