



Оценка потерь бункерного СПГ от испарения



Олег ТАРОВИК



Александр РЕУЦКИЙ



Александр ТОПАЖ

Таровик Олег Владимирович – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия.
Реуцкий Александр Сергеевич – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия.
Топаж Александр Григорьевич – Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия*.

Анализ эффективности транспортных систем, использующих сжиженный природный газ (СПГ) в качестве топлива, невозможен без комплексного понимания объёмов потерь топливного СПГ от испарения в ходе основных технологических операций: перевозки (хранения), бункеровки и захлаживания топливных ёмкостей. Несмотря на активное развитие водного и наземного газомоторного транспорта, практические подходы для получения соответствующих оценок в широком диапазоне характеристик грузовых ёмкостей ранее не публиковались.

Целью настоящей работы является анализ потерь СПГ в автомобильных, железнодорожных и судовых цистернах (ёмкостью до 5600 м³), а также в танк-контейнерах при условии хранения СПГ с избыточным давлением около 5–7 атмосфер.

В работе в качестве метода использовано численное моделирование. Процесс испарения СПГ описывается с помощью моделей теплообмена между жидкой фазой СПГ, его парами, а также грузовым танком и внешней

средой. Это позволяет моделировать поведение и фазовые превращения СПГ при его хранении в ёмкости, а также в ходе основных технологических операций. Численное моделирование термодинамических процессов при хранении СПГ производится с помощью компьютерной имитационной модели, реализованной в среде AnyLogic. Количественные оценки потерь СПГ при бункеровке и захлаживании топливных танков получены на основе аналитических расчётов.

Анализ чувствительности созданных моделей к различным параметрам, а также массовые численные расчёты позволили построить регрессионные зависимости для определения потерь СПГ в ходе рассматриваемых операций. Полученные зависимости могут быть использованы для поиска наиболее эффективных конфигураций системы малотоннажной перевозки СПГ, а также для выполнения экономических оценок целесообразности использования СПГ в качестве топлива на водном и наземном транспорте.

Ключевые слова: морской транспорт, сжиженный природный газ (СПГ), потери СПГ от испарения, судно-бункеровщик СПГ, бункеровка СПГ, захлаживание топливного танка, имитационная термодинамическая модель, регрессионный анализ.

*Информация об авторах:

Таровик Олег Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник самостоятельного сектора проектирования морских систем освоения шельфа ФГУП «КГНЦ» Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия, tarovik_oleg@mail.ru.

Реуцкий Александр Сергеевич – инженер I категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, reucikii_aleksandr@mail.ru.

Топаж Александр Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, alex.topaj@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 16.01.2020, принята к публикации 29.05.2020.

For the English text of the article please see p. 96.

ВВЕДЕНИЕ

Сжиженный природный газ (СПГ) всё чаще используется в качестве топлива на различных видах транспорта. Однако ряд аспектов использования этого нетипичного вида топлива в настоящее время является слабо изученным. В частности, актуальной практической задачей является исследование вопросов потерь СПГ в ходе его транспортировки и выполнения ряда технологических операций, таких, как захлаживание (снижение температуры грузовой ёмкости до -130°C перед непосредственной подачей в неё СПГ) и бункеровка грузовых танков (перемещение СПГ из ёмкости-источника в ёмкость-получатель с захлаживанием остатков СПГ в ёмкости-получателе).

Для решения задач технико-экономического обоснования и оптимизации систем транспортировки СПГ необходимо иметь достаточно простые расчётные зависимости, позволяющие оценивать объёмы потерь груза при транспортировке в виде функций от длительности рейса, характеристик изоляции, температуры окружающей среды и других факторов, которые оказывают влияние на интенсивность испарения. Аналогичные зависимости необходимы для определения потерь СПГ при захлаживании и бункеровке грузовых ёмкостей. Наличие таких зависимостей позволит обоснованно подходить как к вопросу проектирования транспортных средств по доставке СПГ (выбор проектной скорости доставки, соотношение стоимость/эффективность применяемого изоляционного материала и т.п.), так и к прогнозу потерь СПГ при решении задач оперативного планирования работы транспортных средств (составление расписаний движения, прогноз параметров груза в точке доставки и другие). Разработка таких зависимостей является целью настоящего исследования.

Необходимо отметить, что авторам не удалось найти подобных исследований ни в отечественной, ни в зарубежной печати, что, очевидно, обусловлено новизной этой тематики в целом. Множество зарубежных исследований сосредоточены на термодинамическом моделировании процесса хранения СПГ при атмосферном давлении [1; 2]. Этот способ

хранения и транспортировки СПГ является преобладающим с точки зрения объёмов перевозок, поэтому вопрос анализа и прогнозирования потерь от испарения по всей цепочке поставок [3] является достаточно важным. Однако при этом, как правило, используются самые простые способы определения суточных потерь СПГ, основанные на статистических данных. Например, потери СПГ при транспортировке морскими судами-газовозами составляют $0,10\text{--}0,15\%$ от вместимости судна при движении в грузу и $0,06\text{--}0,10\%$ при движении в балласте [4]. Те немногие исследования, которые затрагивают вопрос потерь СПГ при его хранении в условиях избыточного давления $5\text{--}7$ атмосфер, сосредоточены в основном на операционном аспекте, например, на работе судов-бункеровщиков [5]. Таким образом, выполнение настоящего исследования является актуальным.

1. РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ СПГ

Для решения поставленной задачи были созданы специализированные термодинамические модели, позволяющие описывать процессы хранения СПГ, бункеровки и захлаживания ёмкостей, а также разработана стохастическая модель динамики температур воздуха в течение рейса. Детальное описание расчётных соотношений термодинамических моделей, а также функциональные зависимости параметров природного газа от температуры и давления приведены в монографии [6]. Здесь же отметим только базовые расчётные соотношения и принятые допущения.

1.1. Термодинамическая модель для оценки потерь СПГ при хранении

Теплообмен между содержащейся в танке двухфазной средой в состоянии насыщения с температурой T и окружающей средой с температурой T_0 описывается уравнением теплопередачи:

$$dQ/dt = k \cdot (T_0 - T) \cdot F, \quad (1)$$

где Q – поступающая теплота, Дж;

t – время, с;

k – коэффициент теплопередачи $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$;

F – площадь поверхности теплообмена, м^2 .



При использовании формулы (1) отдельно учитываются тепловые потоки Q_1 и Q_2 от внешней среды в жидкую и газообразную фазы соответственно. Эти потоки определяются площадями теплообмена между жидкостью и внешней средой F_1 и между паром и внешней средой F_2 . Температура окружающей среды T_0 рассматривается как внешний динамический параметр. Коэффициент теплопередачи k для стенки, состоящей из слоёв стали и теплоизоляции, определяется по стандартным зависимостям [6, с. 69].

Теплообмен между находящимися при разной температуре жидкостью и газом через границу раздела подчиняется уравнению Ньютона–Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3, \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, Вт;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

T_1 и T_2 – температуры жидкой и газовой фаз соответственно;

F_3 – площадь поверхности раздела фаз, м².

Фазовые переходы между агрегатными состояниями (испарение жидкости и конденсация газа) приводят к изменению давления газовой подушки над жидкой поверхностью и, соответственно, к изменению термодинамических показателей (температура кипения, теплоёмкость и другие). При поступлении теплоты к жидкой фазе для перехода в новое состояние насыщения происходит испарение жидкости, у неё отбирается теплота. Этот процесс испарения в модели описывается соотношением:

$$dM = dQ/r, \quad (3)$$

где dM – приращение массы (кг) паровой фазы при поступлении теплоты dQ (Дж) к жидкой фазе в состоянии насыщения;

r – теплота парообразования СПГ, которая является функцией температуры насыщения (и, тем самым, – давления насыщения), Дж/кг.

При поступлении теплоты к паровой фазе или наличии недогретой жидкости для достижения состояния насыщения происходит конденсация паров – жидкость воспринимает теплоту газовой фазы. Этот процесс описывается уравнением теплового баланса между переданной от пара и воспринятой жидкостью теплотой:

$$\alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3 \cdot dt = G \cdot di, \quad (4)$$

где G – масса выпавшего конденсата, кг;

di – разность энтальпий перегретого пара и жидкости в состоянии насыщения, Дж/кг.

Использование приведённых зависимостей позволяет реализовать алгоритм последовательного пересчёта характеристик состояния жидкости и газа внутри ёмкости. В настоящей работе такой алгоритм был реализован с помощью модификации разработанной ранее в среде *AnyLogic* компьютерной имитационной модели системной динамики [7], в которую также интегрирован стохастический генератор температуры окружающей среды. Отметим несколько аспектов реализации имитационной модели.

Давление паров внутри резервуара не может превышать некоего максимального давления, допускаемого конструкцией ёмкости, и давлением регулировочного клапана. Поэтому при повышении давления выше максимального производится сброс некоторой малой массы паров СПГ, который трактуется как безвозвратная потеря. При численной реализации модели полагается единовременный сброс 5 кг пара, что на 3–4 порядка меньше массы СПГ в ёмкости и позволяет считать стравливание избытков паров практически равномерным. Указанная потеря массы паров позволяет сохранить равновесное состояние системы «жидкость–пар» внутри грузового резервуара, но при этом происходит скачкообразное изменение температуры и массы паровой и жидкой фаз. Моделирование такого события производится на основе допущения о динамической жёсткости системы. Согласно этому допущению, время протекания переходных процессов выравнивания температур в слоях жидкой фазы и возвращения системы к равновесному насыщенному состоянию при скачкообразном изменении условий полагается малым по сравнению с динамикой фонового процесса теплообмена с окружающей средой.

Практические расчёты базировались на конкретных типах криогенных ёмкостей: автоцистерна GT7 ППЦТ-60, вагонцистерна 15–5106 и танк-контейнер СПГ типа КЦМ 40/0,7. Также были рассмотрены судовые танки СПГ типа С цилиндрической формы вместимостью 1700 м³, 2800 м³

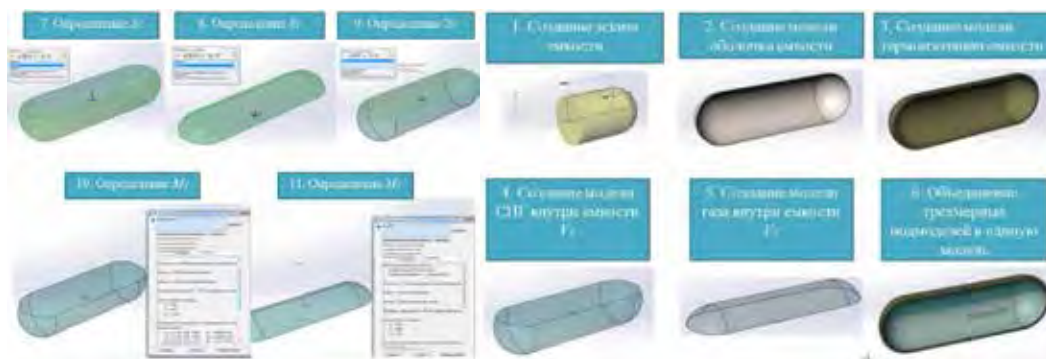


Рис. 1. Определение основных характеристик криогенных ёмкостей в среде SolidWorks.

Таблица 1

Основные характеристики рассматриваемых ёмкостей, полученные на основе анализа открытых материалов

| Тип ёмкости | Геометрический объём, м ³ | Максимально допустимое давление внутри ёмкости, бар | Начальный объём СПГ, м ³ | Начальная масса СПГ, т | Тип изоляции (ЭВ – экранно-вакуумная, ВВ – волокнисто-вакуумная, П – пенополиуретан) | Коэффициент теплопроводности, изоляции Вт/м ² | Толщина слоя изоляции, м | Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² ·К |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------|--|--|--------------------------|---|
| Автоцистерна GT7 СПГ ППЦТ-60 | 60,0 | 7 | 54,0 | 23,2 | ЭВ | 0,00145 | 0,12 | 0,012 |
| Вагон-цистерна 15-5106 | 65,4 | 5 | 58,2 | 25,0 | ВВ | 0,002 | 0,14 | 0,014 |
| Контейнер КЦМ-40 | 39,2 | 7 | 34,9 | 15,0 | ЭВ | 0,00145 | 0,10 | 0,015 |
| Судовой танк 1700 м ³ | 1685 | 5 | 1500 | 645 | П | 0,024 | 0,60 | 0,040 |
| Судовой танк 2800 м ³ | 2809 | 5 | 2500 | 1075 | П | 0,024 | 0,60 | 0,040 |
| Судовой танк 5600 м ³ | 5618 | 5 | 5000 | 2150 | П | 0,024 | 0,60 | 0,040 |

и 5600 м³. Поскольку в открытом доступе имеются не все необходимые технические параметры этих ёмкостей, в среде *SolidWorks* были созданы их трёхмерные модели (рис. 1), которые позволили получить все необходимые геометрические и массовые параметры (табл. 1).

Помимо этого, на основе 3D-моделей ёмкостей были также построены зависимости безразмерных значений характерных площадей F_1 , F_2 и F_3 в виде функции от уровня наполнения. Эти зависимости далее использовались при выполнении расчётов.

1.2. Термодинамические модели для оценки потерь СПГ при захлаживании и бункеровке топливных резервуаров

Захлаживание топливного танка предполагает его охлаждение от некоторой

температуры $T_0 \geq 143 \text{ K}$ ($\approx -130^\circ\text{C}$) до температуры $T_{30} = 143 \text{ K}$ путём подачи малых порций СПГ. Равномерность захлаживания обеспечивается работой распылительных форсунок внутри танка. Получаемые в результате распыления капли СПГ испаряются, забирая теплоту у металлоконструкций и изоляции танка, поэтому захлаживание сопровождается интенсивным парообразованием.

Для снижения температуры танка необходимо испарить СПГ массой:

$$M_{3,1} = (\sum M_i \cdot c_i) \cdot \Delta T / r, \quad (5)$$

где M_i – массы жидкой и газообразной фаз СПГ в танке в начале процесса захлаживания, а также массы стенок и тепловой изоляции криогенного танка, кг;

c_i – теплоёмкости охлаждаемых масс, Дж/кг·К;



$\Delta T = (T_{30} - T_0)$ – градиент температур, представляющий собой разность между температурой ёмкости в начале T_0 и в конце T_{30} захлаживания, К.

Темп захлаживания υ_3 определяется допустимыми термическими напряжениями конструкций грузового резервуара и составляет, как правило, 5...10 К/час [8]. Время захлаживания t_3 можно определить по соотношению:

$$t_3 = \Delta T / \upsilon_3, \quad (6)$$

За это время в резервуар через изоляцию поступает теплота, которую также надо компенсировать впрыскиванием жидкого СПГ массой $M_{3,2}$. Определение количества СПГ, необходимого для компенсации тепла, поступившего за время t_3 , выполняется на основании формул (1)–(4).

Таким образом, масса СПГ, расходуемого на захлаживание ёмкости, определяется по соотношению:

$$M_3 = M_{3,1} + M_{3,2}, \quad (7)$$

Потери СПГ при бункеровке резервуара, предварительно охлаждённого до температуры $T_3 \leq T_{30}$ сжиженным природным газом, подаём при температуре $T_{СПГ} = 110$ К, могут быть рассчитаны аналогично, то есть как сумма потерь, обусловленных двумя процессами:

- охлаждение металлоконструкций, жидкости и пара внутри грузового танка от температуры T_3 до температуры $T_{СПГ}$;
- поступление теплоты через изоляцию грузового танка.

Описание соответствующего дифференциального уравнения, позволяющего определить температуру грузового танка и его содержимого в каждый момент операции бункеровки, приведено в [6, с. 84]. Анализ этой расчётной модели показал, что составляющей потерь СПГ, обусловленной поступлением теплоты извне грузового танка, можно пренебречь, поскольку для характерных значений теплопроводности изоляции ($k = 0,01...0,04$ Вт/м²·К) и длительности бункеровки (2...4 часа) её доля в общих потерях не превышает 1 %. Отметим, что в случае захлаживания грузового резервуара, этой составляющей пренебрегать нежелательно, т.к. длительность операции может достигать 30 часов, а относительная доля потерь из-за теплообмена с внешней средой при этом составляет 7...10 %.

Итак, с достаточной для решения практических задач точностью можно определять потери СПГ при бункеровке по соотношению (5), в котором значение градиента температур принимается равным $\Delta T = T_3 - T_{СПГ}$.

1.3. Стохастический генератор динамики забортовой температуры

Моделирование условного рейса транспортного средства, перевозящего СПГ, производится в предположении о стохастически изменяющейся температуре окружающей среды. При этом применяется подход, позволяющий смоделировать динамику колебаний температуры как случайный процесс с заданными автокорреляционными свойствами. Для этого в условных точках отправления и назначения в каждый такт модельного времени рассчитывается текущее значение температуры воздуха, которое определяется как величина детерминированного временного тренда плюс случайная добавка, моделируемая с помощью скалярного формирующего фильтра первого порядка (одномерный стохастический генератор погоды) [9]. Временной тренд температуры в обеих точках описывается как суперпозиция двух гармонических функций, представляющих собой годовой ход среднесуточной температуры и суточный ход температуры.

Таким образом, текущее значение температуры воздуха T в точках отправления (T_{dep}) и назначения (T_{des}) рассчитывается для каждого часа модельного времени t по соотношению:

$$T = T_d + 0,5 \cdot R_d \cdot \cos(2\pi/24 \cdot (h - 14)) + D \cdot x_h, \quad (8)$$

где R_d – заданная амплитуда суточного хода температуры;

h – текущее время суток в часах (0...24);

D – среднеквадратичное отклонение текущей температуры от среднего тренда, учитывающего годовой и суточный ход;

T_d – среднесуточное значение температуры в данной географической точке для данного дня календарного года;

x_h – случайная центрированная нормированная добавка к температуре (стохастическое возмущение среднего тренда).

Изменение среднесуточных температур T_d в точке отправления или назначения моделируется соотношением:

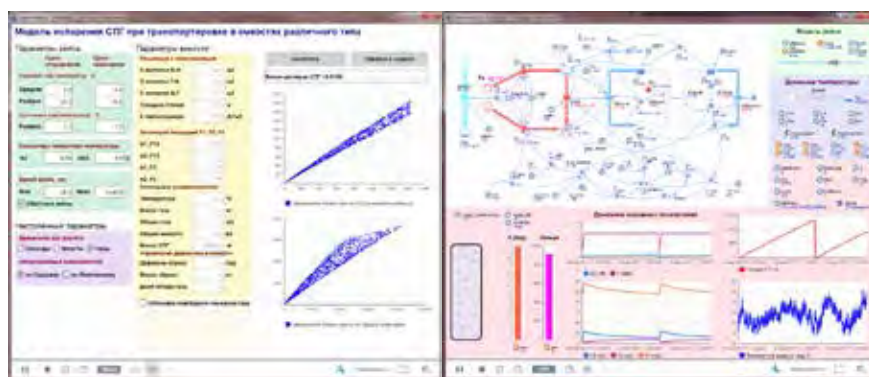


Рис. 2. Основное окно имитационного эксперимента (слева) и термодинамическая модель испарения СПГ (справа) в среде AnyLogic.

$T_d = T_{ave} + 0,5 \cdot R_y \cdot \cos(2\pi/365 \cdot (d - 200))$, (9)
 где R_y – амплитуда годового хода среднесуточной температуры;

T_{ave} – среднегодовая температура;

d – номер текущего дня в году, отсчитываемый от 1 января.

Величина x_h вычисляется с помощью скалярного формирующего фильтра первого порядка, что позволяет отразить автокорреляционные свойства динамики аномалий температуры как случайного процесса:

$$x_h = \rho \cdot x_{(h-1)} + \sqrt{(1 - \rho^2)} \cdot \varepsilon;$$

$$x_h = \rho \cdot x_{h-1} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

где ε – случайная стандартизированная нормальная величина.

Величины T_{ave} , R_y и R_d задаются отдельно для географических точек отправления и назначения, а ρ и D считаются общими параметрами генератора погоды.

Температура T_0 за бортом транспортного средства определяется с помощью линейной аппроксимации между моделируемыми значениями температур между точками отправления T_{dep} и назначения T_{des} , исходя из известной длительности рейса.

$$T_0 = T_{dep} \cdot (1 - t/t_v) + T_{des} \cdot (t/t_v), \quad (11)$$

где t – время, прошедшее от начала рейса;

t_v – общее время рейса.

Для идентификации параметров генератора температур воздуха использовались данные многолетних исторических наблюдений на территории России [10]. Рассматривался некоторый условный рейс транспортного средства между городами Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Волгоград, Казань. В результате было

принято: $T_{ave} = 4...8 \approx 6^\circ\text{C}$, $R_y = 24...28 \approx 26^\circ\text{C}$, $R_d = 5...12 \approx 7^\circ\text{C}$. Параметры ρ и D были определены по результатам обработки многолетних данных фактических измерений температуры для опорных метеостанций Белогорка (Ленинградская область) и Саратов. В целом, можно заключить, что характерные значения этих параметров на территории центральной России оказываются достаточно стабильными: $\rho \approx 0,98$ (при часовом шаге генератора), $D = 3,1...7,8 \approx 5^\circ\text{C}$.

2. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЁТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Модель термодинамических процессов, происходящих при хранении СПГ, имеет динамический характер, поэтому она была реализована в среде AnyLogic совместно со стохастической моделью заборной температуры. Модели же для определения потерь СПГ при бункеровке и захлаживании статичны, поэтому они были выполнены в виде стандартных программных приложений, поддерживающих функции разового или множественного расчёта на основе набора входных параметров.

В графическом интерфейсе имитационного эксперимента (рис. 2) задаются параметры текущего варианта расчёта (длительность рейса, характеристики грузового танка, динамика изменения температур в рейсе), отслеживаются основные результаты, а также отображается ход исполнения [11].

Программные приложения для выполнения расчётов потерь СПГ при захлаживании и бункеровке топливного танка



Расчёты потерь СПГ для автоцистерны типа GT7 ППЦТ-60

| № | Дата начала рейса | Длительность, сут | Сумма градусо-дней, °С (отсчёт от -40°С) | Средняя температура в рейсе, °С | Потерянный СПГ, кг |
|---|-------------------|-------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| Постоянная длительность рейса, постоянные градусо-дни | | | | | |
| 1 | 11 янв | 4,17 | 156,0 | -2,55 | 320,2 |
| 2 | 22 мар | 4,17 | 156,2 | -2,52 | 320,4 |
| 3 | 2 апр | 4,17 | 156,8 | -2,36 | 320,6 |
| 4 | 1 ноя | 4,17 | 156,5 | -2,43 | 320,5 |
| 5 | 19 ноя | 4,17 | 156,4 | -2,45 | 320,4 |
| Переменная длительность рейса, постоянные градусо-дни | | | | | |
| 6 | 10 янв | 4,83 | 156,3 | -7,61 | 356,5 |
| 7 | 26 янв | 5,03 | 156,2 | -8,94 | 367,7 |
| 8 | 4 фев | 5,37 | 156,6 | -10,83 | 386,1 |
| 9 | 9 фев | 5,09 | 156,1 | -9,34 | 370,8 |
| 10 | 8 сен | 2,83 | 156,4 | 15,21 | 247,8 |

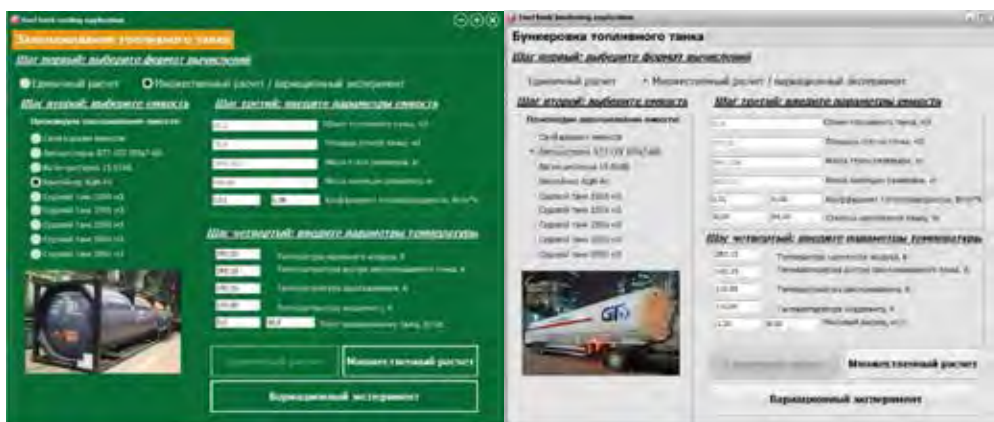


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программных приложений для расчётов захолаживания (слева) и бункеровки (справа) ёмкостей СПГ.

схожи между собой по функционалу и представляют собой расчётные модели, реализованные средствами *Embarcadero Delphi* (рис. 3). Графический интерфейс позволяет конфигурировать тип ёмкостей и начальные условия для выполнения расчётов.

3. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ ХРАНЕНИИ

Для получения искомым регрессионных зависимостей, позволяющих определять потери СПГ от испарения в ходе рейса газотопливных транспортных средств, была выполнена серия массовых численных экспериментов. Начальная

температура грузового танка и его содержимого полагалась равной $T = 110 \text{ K}$, а давление в танке в начале имитационного эксперимента принималось равным атмосферному.

В ходе серии имитационных экспериментов на основе приведённого в табл. 1 типоразмерного ряда топливных ёмкостей анализировалось влияние на конечные потери СПГ таких факторов, как объём танка, коэффициент теплопередачи изоляции, длительность рейса, среднерейсовая температура окружающей среды и другие. Всего было рассмотрено более 50 расчётных случаев, для каждого из которых выполнялось не менее 3000 условных рейсов транспортных средств,

что позволило добиться статистической репрезентативности результатов моделирования.

В первую очередь был выполнен анализ влияния динамики изменения температуры в ходе рейсов различной длительности на результирующие потери СПГ. Примеры таких расчётов приведены в табл. 2, где отображена выборка из результатов моделирования рейсов автоцистерны типа GT7 ППЦТ-60 при близком значении суммы градусо-дней (при расчёте суммы градусо-дней за точку отсчёта принимается температура -40°C).

В первом блоке расчётов постоянно время рейса и приблизительно одинакова сумма градусо-дней (или средняя температура в течение рейса), изменяется только дата начала рейса и связанный с нею характер изменения температур. Несмотря на разные даты и на очевидно различную динамику температур в течение рейса, масса потеряннного СПГ практически одинакова и колеблется в пределах $320,2...320,6$ кг. Второй блок расчётов представляет собой выборку результатов расчётов для той же автоцистерны, но при переменной длительности рейса. Из этих данных видна практически абсолютная корреляция потерь СПГ с длительностью рейса при условии приблизительно одинаковых значений суммы градусо-дней. Чем продолжительнее рейс, тем выше потери, при этом средняя температура в рейсе варьируется от -11°C до $+15^{\circ}\text{C}$. Эти результаты говорят о том, что динамика температур в рейсе оказывает пренебрежимо малое влияние на величины результирующих потерь СПГ, а определяющую роль играет именно сумма градусо-дней и длительность перевозок. Другими словами, при прогнозировании количества потерь СПГ достаточно знать длительность рейса и осреднённую температуру воздуха. Это обусловлено линейным и аддитивным характером рассматриваемого термодинамического процесса испарения СПГ.

На основании этих выводов, а также в результате обработки данных массовых расчётов была предложена регрессионная зависимость для определения массы сжиженного природного газа M_x , теряемого в ходе рейса (или при стационарном хра-

нении), как функции от четырёх параметров: длительности рейса, температуры в рейсе, коэффициента теплопередачи и массы перевозимого СПГ. Зависимость имеет следующий вид:

$$M_x = A \cdot k \cdot T_x^{0,884} \cdot t_{\text{cp}}^B, \text{ кг}, \quad (12)$$

где k – коэффициент теплопередачи тепла в СПГ от окружающей среды, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$;

T_x – длительность хранения СПГ, час;

t_{cp} – средняя температура воздуха, рассчитываемая путём усреднения температур в ходе рейса, K ;

$A = A(M_{\text{СПГ}})$ – регрессионный коэффициент, зависящий от начальной массы СПГ в грузовом танке;

$B = B(k)$ – регрессионный коэффициент, зависящий от характеристик теплоизоляции танка.

Оказалось, что для ёмкостей разного типа характерно одно значение регрессионного коэффициента, стоящего в качестве показателя степени параметра T_x . Это, вероятно, обусловлено одинаковым характером физических процессов, протекающих при испарении СПГ в различных ёмкостях. Также было установлено, что значение коэффициента A может быть связано с количеством перевозимого СПГ. В качестве показателя, характеризующего количество СПГ, можно принимать либо объём ёмкости, либо массу перевозимого в ней СПГ. Последний параметр является предпочтительным, поскольку позволяет учесть ограничения по уровню наполнения танка. Зависимость для определения коэффициента A имеет вид:

$$A = 2,76 \cdot 10^{-6} \cdot M_{\text{СПГ}}^{0,66}, R^2 = 0,999, \quad (13)$$

где $M_{\text{СПГ}}$ – масса хранящихся в ёмкости жидкой и газообразной фаз СПГ, кг;

R^2 – коэффициент детерминации.

Следует иметь в виду, что значение $M_{\text{СПГ}}$ соответствует максимальному уровню наполнения танка, составляющего около 90 % от геометрического объёма. Применение зависимости (12) при меньших уровнях наполнения приведет к недооценке объёмов потерь СПГ. Степень этой недооценки увеличивается по мере уменьшения уровня наполнения.

Зависимость $B = B(k)$ была найдена путём выполнения численных экспериментов с ёмкостью типа КЦМ-40/0,7 при изменении k в диапазоне от 0,002 до 0,150 $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$. Полученная зависимость оказалась спра-



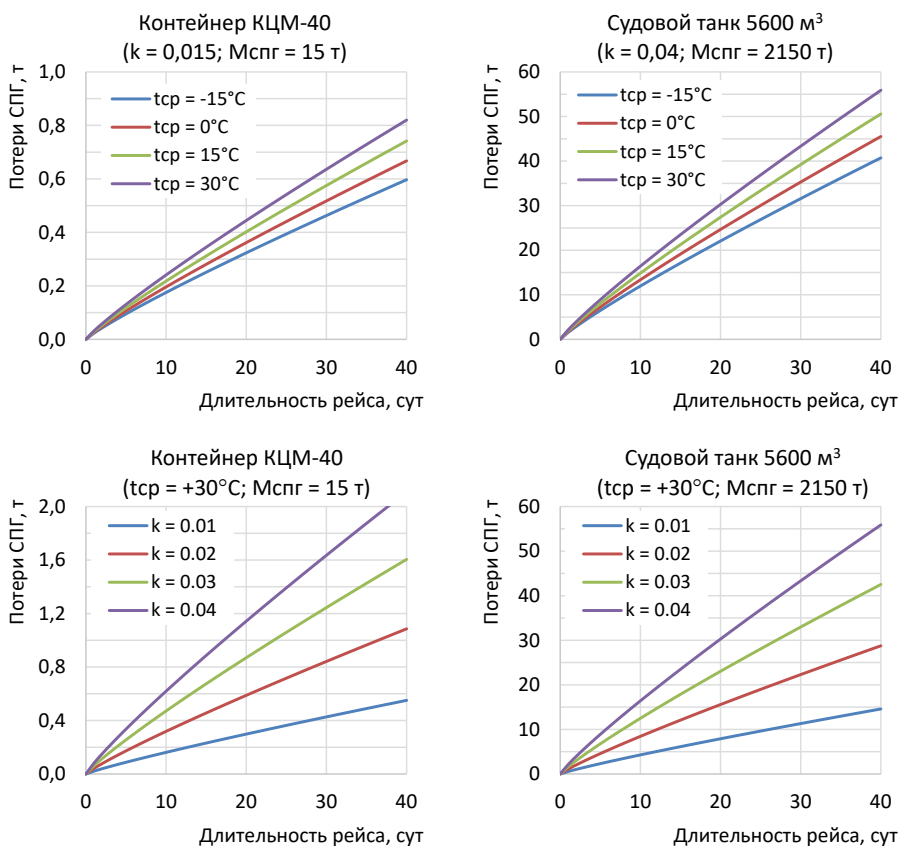


Рис. 4. Расчёты потерь СПГ для различных ёмкостей в зависимости от длительности рейса, средней температуры в рейсе и коэффициента теплопередачи.

ведливой и для ёмкостей других типов:
 $B = 1,98 - 0,253 \cdot k$, $R^2 = 0,9$. (14)

Точность аппроксимации результатов модельных расчётов зависимостью (12) оказалась весьма высокой, среднеквадратическое отклонение потерь СПГ составило 0,007 %...0,018 % от начальной массы для ёмкостей всех рассмотренных типов. Наибольшие относительные погрешности наблюдаются при малой длительности рейса. Иллюстрация значений потерь СПГ, получаемых на основе зависимости (12) при различных значениях среднерейсовых температур и коэффициента k , показана на рис. 4.

Для подтверждения точности полученных оценок было выполнено сопоставление расчётных потерь СПГ со спецификационными данными танк-контейнера КЦМ-40, согласно которым наибольшая возможная суточная потеря от испарения при стационарном хранении составляет 0,28 % при температуре наружного воздуха

306 К (33°C) и давлении внутри ёмкости 0,1 МПа. Расчётное значение коэффициента теплопроводности для цистерны этого типа составляет $k = 0,015$ Вт/м²·К (получено авторами на основании косвенных данных). Согласно зависимости (12) за первые сутки хранения СПГ при температуре 33°C испарится 32,1 кг СПГ, что составляет 0,21 % от общего количества СПГ. Полученный результат неплохо согласуется с натурными данными, особенно если учесть, что спецификационные данные обычно указываются с некоторым запасом, а также то, что фактическое значение коэффициента теплопроводности для цистерн этого типа может отличаться от принятого в расчётах.

4. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ ЗАХОЛАЖИВАНИИ

При исследовании процесса захлаживания топливной ёмкости учитывались

Расчёты потерь СПГ при захлаживании контейнера КЦМ-40

| № | Температура ёмкости в начале захлаживания, T_0 , К | Темп захлаживания, К/час | Коэффициент передачи тепла, Вт/м ² ·К | Потерянный СПГ, кг |
|---------------------------------------|--|--------------------------|--|--------------------|
| Постоянный коэффициент передачи тепла | | | | |
| 1 | 293,15 | 5,0 | 0,01 | 516 |
| 2 | 293,15 | 7,0 | 0,01 | 509 |
| 3 | 293,15 | 9,0 | 0,01 | 505 |
| Постоянный темп захлаживания | | | | |
| 4 | 293,15 | 5,0 | 0,01 | 516 |
| 5 | 293,15 | 5,0 | 0,03 | 566 |
| 6 | 293,15 | 5,0 | 0,05 | 617 |

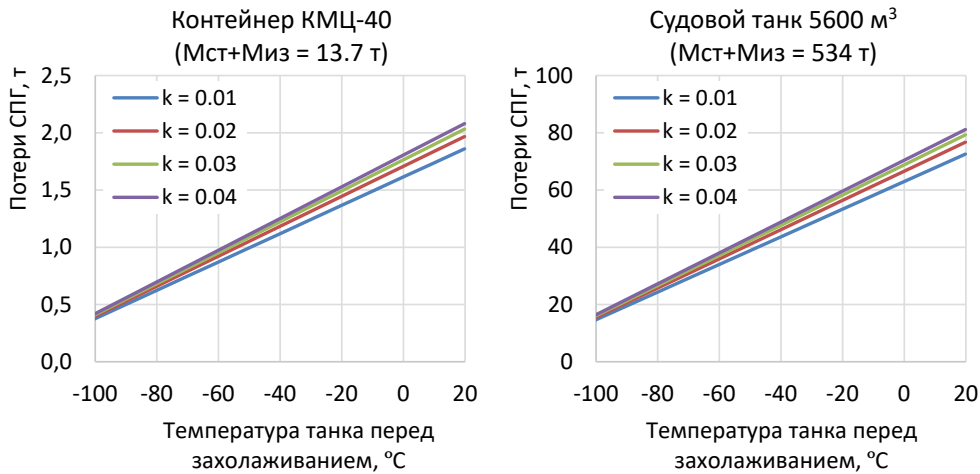


Рис. 5. Расчётные значения потерь СПГ при захлаживании.

такие факторы, как первоначальная температура внутри ёмкости T_0 , его собственная масса, теплопроводность изоляции и темп захлаживания. Результаты расчётов свидетельствуют о том, что последний параметр достаточно слабо влияет на количество теряемого СПГ. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты расчётов захлаживания контейнер-цистерны КЦМ-40 при постоянном значении температур топливного резервуара в начале и в конце этого процесса. Видно, что несмотря на изменение темпа захлаживания в диапазоне от 5 до 9 К/час, масса потерянного СПГ при постоянном k изменяется лишь на 2 %. Также в табл. 3 приведены результаты расчётов при переменном коэффициенте передачи тепла и постоянном темпе захлаживания. В этом случае существует сильная корреляция потерь СПГ с коэффициентом передачи тепла.

В результате была предложена следующая регрессионная зависимость для определения массы сжиженного газа M_3 , теряемой при захлаживании ёмкости до температуры $T_{30} = 143$ К:

$$M_3 = C \cdot k^D \cdot (M_{ст} + M_{из}), \text{ кг}, \quad (15)$$

где $M_{ст}$ – масса стали криогенной ёмкости, кг;

$M_{из}$ – масса изоляции ёмкости, кг;

$C = C(T_0)$ – регрессионный коэффициент, зависящий от температуры T_0 ёмкости в начале захлаживания;

$D = D(M_{ст} + M_{из})$ – регрессионный коэффициент, зависящий от массы ёмкости.

В ходе численных экспериментов были получены следующие зависимости для определения коэффициентов C и D :

$$C = 0,00131 \cdot T_0 - 0,187, R^2 = 0,999; \quad (16)$$

$$D = 0,0046 \cdot \ln(M_{ст} + M_{из}) + 0,02, R^2 = 0,978. \quad (17)$$

Для приближенных оценок суммы масс $M_{ст}$ и $M_{из}$ судовых цилиндрических танков



Расчёты потерь СПГ при бункеровке судового танка объёмом 1000 м³

| № | Температура ёмкости в начале бункеровки, Т, К | Производительность насосов, кг/час | Коэффициент передачи тепла, Вт/м ² ·К | Потери СПГ, кг |
|---------------------------------------|---|------------------------------------|--|----------------|
| Постоянный коэффициент передачи тепла | | | | |
| 1 | 143,15 | 20,0 | 0,01 | 13065 |
| 2 | 143,15 | 75,5 | 0,01 | 13055 |
| 3 | 143,15 | 130,0 | 0,01 | 13053 |
| Постоянная производительность насоса | | | | |
| 4 | 143,15 | 20,0 | 0,01 | 13065 |
| 5 | 143,15 | 20,0 | 0,03 | 13091 |
| 6 | 143,15 | 20,0 | 0,05 | 13118 |

при известном геометрическом объёме V (м³) была получена следующая приближенная зависимость, справедливая при отношении длины танка к диаметру в диапазоне 4,2...5,0, расчётном избыточном давлении 4,5 атм. и изоляции танка из пенополиуретана толщиной 0,6 м.

$$(M_{\text{ст}}) + (M_{\text{из}}) = (60 \cdot V + 2900) + (620 \cdot V^{0.66}), \text{ кг.} \quad (18)$$

Примеры результатов расчётов по этой зависимости показаны на рис. 5. Масса КЦМ-40 принята согласно спецификационным данным равной 13,7 т. Из рисунка видно, что значение коэффициента теплопроводности k слабо влияет на результат, т.к. доля потерь СПГ, обусловленных поступлением тепла извне, невелика.

Среднеквадратическое отклонение величины потерь СПГ, рассчитанной по формуле (15), от результатов расчётов на основании точных алгоритмов составляет около 3 % ... 4 % от суммарных потерь на охлаждение ёмкости, что говорит о достаточной точности приближенной формулы.

5. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ СПГ ПРИ БУНКЕРОВКЕ

При моделировании процесса бункеровки резервуара, предварительно охлаждённого до температуры $T_3 \leq T_{30}$, принималось несколько допущений, соответствующих наиболее вероятному эксплуатационному сценарию. Считалось, что в начале бункеровки топливный танк заполнен до минимально допустимого уровня (от 10 % до 50 % по объёму), а температура подаваемого бункерного СПГ

равна $T_{\text{спг}} = -161^\circ\text{C}$, причём в конце процесса бункеровки содержимое танка имеет температуру $T_{\text{спг}}$. Кроме того, полагалось, что работа насосного оборудования не влияет на нагрев СПГ и не оказывает значимого влияния на парообразование.

При анализе результатов расчётов было установлено, что длительность выполнения бункеровочных операций (т.е. производительность грузовых насосов) практически не влияет на количество образующегося отпарного газа. Характеристики тепловой изоляции и масса ёмкости также слабо сказываются на потерях газа. Для иллюстрации этих выводов в табл. 4 приведены результаты расчётов бункеровки судового танка объёмом 1000 м³ при постоянном значении температуры топливного резервуара в начале бункеровки.

Основное влияние на массу теряемого газа оказывают первоначальная температура внутри топливного танка и масса содержащихся в нём остатков СПГ. Чем ниже температура остатков СПГ, тем меньше потери при бункеровке. Аналогично, чем больше объём остаточного СПГ, требующего охлаждения до температуры $T_{\text{спг}}$, тем выше потери.

Эти результаты позволили сформировать следующую формулу для определения потерь СПГ в ходе бункеровки:

$$M_{\text{б}} = E \cdot M_{\text{ост}}^F, \text{ кг,} \quad (19)$$

где $M_{\text{ост}}$ – масса остатков СПГ, содержащихся в ёмкости в начале бункеровки (от 10 % до 50 % заполнения), кг;

$T_3 \leq 143 \text{ К}$ – температура предварительно захлажденной ёмкости, К;

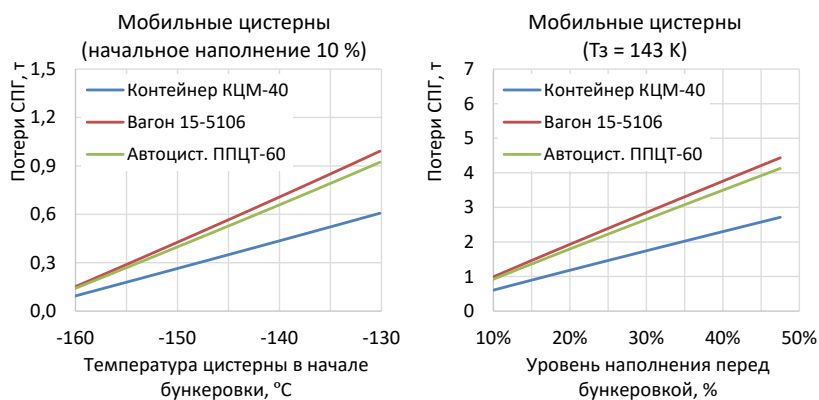


Рис. 6. Расчётные значения потерь СПГ при бункеровке мобильных цистерн.

$E = E(T_3)$, $F = F(T_3)$ – коэффициенты, зависящие от температуры ёмкости в начале бункеровки, полученные в ходе численных экспериментов.

$$E = 0,0116 \cdot T_3 - 1,248, R^2 = 0,999; \quad (20)$$

$$F = 1,895 \cdot 10^{-5} \cdot T_3^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \cdot T_3 + 1,133, R^2 = 0,999. \quad (21)$$

Среднеквадратическое отклонение регрессионных значений от модельных расчётов составляет 0,2 %...0,94 % от количества бункерного СПГ. Иллюстрация расчётных потерь СПГ, получаемых на основе расчётов по формуле (19), приведена на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье предложены простые регрессионные зависимости для оценки потерь СПГ в ходе перевозки (хранения), бункеровки и захлаживания топливных танков различного типа. Зависимости получены путём обработки результатов серии компьютерных экспериментов с имитационной моделью и аналитических расчётов. Они применимы для ёмкостей с максимальным допустимым давлением до 7 атмосфер при произвольных значениях вместимости. Несмотря на то, что изначально в рамках исследования рассматривались конкретные типы грузовых танков, анализ результатов расчётов позволил предложить универсальные формулы для оценки потерь СПГ, которые могут быть использованы для выполнения оценочных расчётов для всех типов криогенных ёмкостей. Полученные результаты могут применяться при оптимизации систем малотоннажной перевозки СПГ, проектировании соответствующих транспортных средств, а также при выполнении различных технико-экономических оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adom, E., Islam, S.Z., Ji, X. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, 2010, Vol. 2 (4), pp. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15/S06.051>.

2. Wlodek, T. Prediction of boil off rate in liquefied natural gas storage processes. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, pp. 27–29. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/15>.

3. Dobrota, D., Lalic, B., Komar, I. Problem of Boil-off in LNG supply chain. *Transactions on Maritime Sciences*, 2013, Vol. 2, pp. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v02.n02.001>.

4. Glomski, P., Michalski, R. Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers. *Journal of Polish CIMAC*, 2011, Vol. 6 (1), pp. 133–140. [Электронный ресурс]: <http://www.polishcimeac.pl/Papers1/2011/014.pdf>. Доступ 16.01.2020.

5. Kim, K., Park, K., Roh, G., Chun, K. Case Study on Boil-Off Gas (BOG) Minimization for LNG Bunkering Vessel Using Energy Storage System (ESS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, Vol. 7 (5), 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse7050130>.

6. Павловский В. А., Реуцкий А. С. Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2019. – 170 с.

7. Топаж А. Г., Павловский В. А., Скуднєв С. А. Динамическая модель транспортировки сжиженного природного газа в судовых танках // Сб. трудов VII всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – 2015. – С. 275–279.

8. Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities. DNV GL Recommended practice (DNVGL-RP-0006:2014-01). [Электронный ресурс]: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RP/2014-01/DNVGL-RP-0006.pdf>. Доступ 16.01.2020.

9. Май Р. И., Таровик О. В., Топаж А. Г. Моделирование морской погоды как входного сигнала имитационных моделей транспортных и экологических систем в арктическом регионе // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29. – № 3. – С. 20–38.

10. Новости погоды. [Электронный ресурс]: www.meteonovosti.ru. Доступ 16.01.2020.

11. Топаж А. Г., Реуцкий А. С., Таровик О. В. Программа для термодинамического моделирования испарения газа в топливных танках судов и танк-контейнерах // Св-во программы ЭВМ RU № 2018664683. Дата регистрации 20.11.2018.

