

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512

EFFICIENCY OF FUEL GAS SUPPLY ON LNG-FUELED VESSELS

D. S. Vatolin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The widespread use of LNG as a fuel for marine internal combustion engines makes to pay attention to the quality of gas fuel supply systems and its specifics. The objective of this paper is to review modern gas fuel supply systems and analyze their efficiency. The goal is to determine the most important parameters of gas fuel that affect the stability of the working process of marine dual-fuel engines and ways to maintain them within the specified limits. Evaluation of the gas fuel preparation efficiency is carried out on the basis of operational data obtained on the gas carrier vessel board. Data collection is carried out under non-standard operating conditions, which makes it possible to evaluate the quality of the resulting gas fuel with a time-varying composition of the initial natural gas. To analyze the obtained data, modern software, which is used by leading developers of marine diesel engines, is used (Wartsila Methane Number Calculator, AVL Boost™ and Python 3 statistic libraries). The analysis results are approximated for gas fuel supply systems for gas-fueled vessels, but not being gas carriers. This approximation is made taking into account the design features of gas fuel supply systems, since the specificity of the design imposes certain restrictions on the applicability of the conclusions obtained as a result of the previous analysis. Also, attention is paid to the accumulation of residual heavy hydrocarbons in bunker tanks, the excess of which can adversely affect the quality of gas fuel. Since there is no universal way to solve this problem, only general assumptions about possible ways to dispose of them have been made.

Keywords: fuel gas supply systems, dual fuel diesel engines, LNG bunkering systems.

For citation:

Vatolin, Dmitrii S. "Efficiency of fuel gas supply on LNG-fueled vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.

УДК 621.43

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ НА СУДАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

Д. С. Ватолин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой обзорного исследования является анализ качества газовой топливоподготовки и ее специфики ввиду широкого распространения СПГ в качестве топлива для судовых двигателей внутреннего сгорания. Задачей данной статьи является рассмотрение современных систем газовой топливоподготовки и проведение анализа качества их работы. Целью работы является определение наиболее важных параметров газового топлива, влияющих на стабильность рабочего процесса судовых двухтопливных двигателей, и способы их поддержания в заданных пределах. Оценка эффективности газовой топливоподготовки осуществлялась на основе эксплуатационных данных полученных на борту судна-газовоза. Сбор данных осуществлялся в нестандартных условиях эксплуатации, что позволило оценить качество получаемого газового топлива при изменяющейся во времени композиции исходного природного газа. Для анализа полученных данных применялось современное программное обеспечение, используемое ведущими разработчиками судовых дизельных двигателей (Wärtsilä Methane Number Calculator, AVL Boost™ и статистические пакеты Python 3). Результаты анализа были аппроксимированы для систем газовой топливоподготовки судов, использующих природный газ в качестве топлива, но не являющихся газовозами. Данная аппроксимация производилась с учетом конструктивных особенностей систем газовой

топливоподготовки, так как специфика конструкции накладывает определенные ограничения на применимость полученных в результате предшествующего анализа выводов. Также в работе уделено внимание вопросам накопления в бункерных танках остаточных тяжелых углеводородов, избыточное количество которых может негативно сказываться на качестве газового топлива. Так как универсального способа решения данной проблемы не существует, были выдвинуты общие предположения о возможных способах утилизации остаточных тяжелых углеводородов.

Ключевые слова: системы газовой топливоподготовки, двухтопливный двигатель, системы бункеровки СПГ.

Для цитирования:

Ватолин Д. С. Оценка эффективности топливоподготовки на судах, использующих в качестве топлива сжиженный природный газ / Д. С. Ватолин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.

Введение (Introduction)

Ввиду значительного увеличения доли рынка торговли сжиженным природным газом (СПГ) [1], ужесточения экологических требований в зонах контроля выбросов оксида азота (Nitrogen Emission Control Area — NECA Zone) [2], а также вступления в силу Международного кодекса по безопасности для судов, использующих газы или иные виды топлива с низкой температурой вспышки (Кодекс МГТ) количество судов, использующих природный газ в качестве топлива [3], стремительно растет. Так, в начале 2020 г. в эксплуатации находилось более 175 судов-газоходов (не считая 600 судов-газовозов) [4]. По данным Det Norske Veritas [5], в 2021 г. в эксплуатации находилось 251 судно-газоход и были сделаны заказы на постройку еще 403 судна. Столь стремительное развитие флота, использующего СПГ в качестве топлива, послужило серьезным стимулом к развитию двухтопливных дизельных двигателей как наиболее экономичного вида силовых установок. За последние 20 лет производители судовых дизельных двигателей провели большую работу по увеличению экономичности, надежности и устойчивости рабочего процесса двигателей, работающих на природном газе.

Двухтопливные дизельные двигатели предъявляют определенные требования к качеству топлива. Одной из наиболее важных характеристик топлива является его метановое число (МЧ)¹, являющееся характеристикой детонационной стойкости двигателя. Как правило, для устойчивой работы современных двухтопливных двигателей (ДД) МЧ должно быть не ниже 80.

Ввиду того, что композиция природного газа, используемого в качестве топлива, с течением времени может меняться, и, как следствие, будет меняться его МЧ, перед производителями топливных систем ставится задача организовать топливоподачу, способствующую стабилизации этого параметра.

Целью статьи является анализ существующих систем газовой топливоподготовки и оценка их эффективности, а также определение наиболее важных параметров газового топлива, влияющих на стабильность рабочего процесса двухтопливных двигателей, и способа их поддержания в необходимом диапазоне.

Основная часть (The Main Part)

Топливоподача на судах-газовозах. Рассматривается система топливоподготовки СПГ-танкера с дизель-электрической системой электродвижения: главные дизель-генераторы (ДГ), оснащенные системой подачи газа низкого давления (5 бар), которые приводят в действие генераторы переменного тока, вырабатывающие электроэнергию для гребных электродвигателей (ГЭД) — рис. 1.

Для судов с другими типами главных двигателей система топливоподдачи может отличаться, при этом основные принципы ее конфигурирования остаются актуальными. Принципиальная система подачи топлива, применяемая на современных СПГ-танкерах, представлена на рис. 2.

¹ ГОСТ 34704–2020. Газ природный. Определение метанового числа. М.: Стандартинформ, 2021. 13 с.

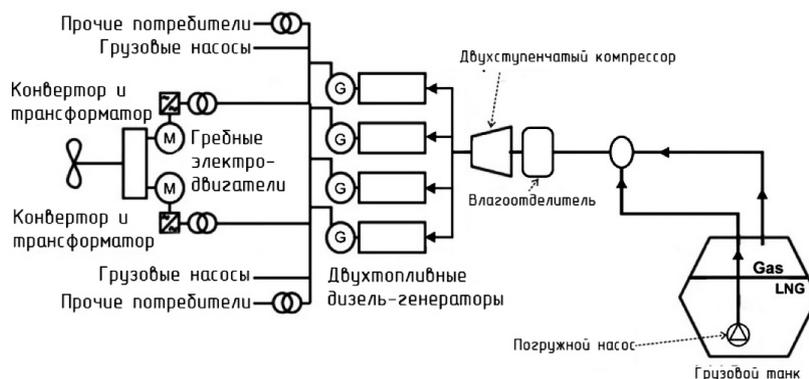


Рис. 1. Дизель-электрическая энергетическая установка СПГ-танкера

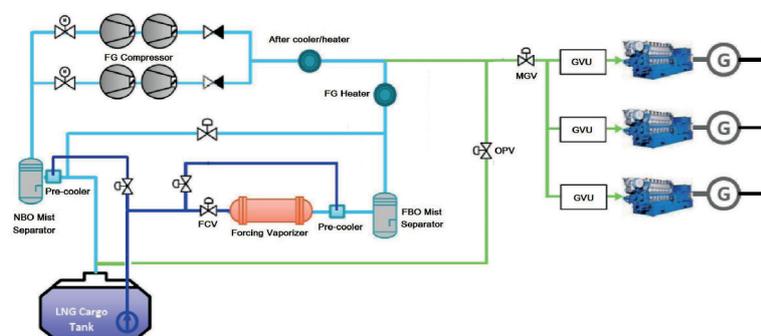


Рис. 2. Принципиальная система подачи топлива

Испарения газа (Natural Boil-Off Gas — NBOG) отбираются из грузовых танков и подаются компрессором (Fuel Gas Compressor — FG Compressor) на главные двигатели. В качестве газового компрессора используется двухступенчатый осерадialный компрессор фирмы Cryostar типа CM2-200 (рис. 3).

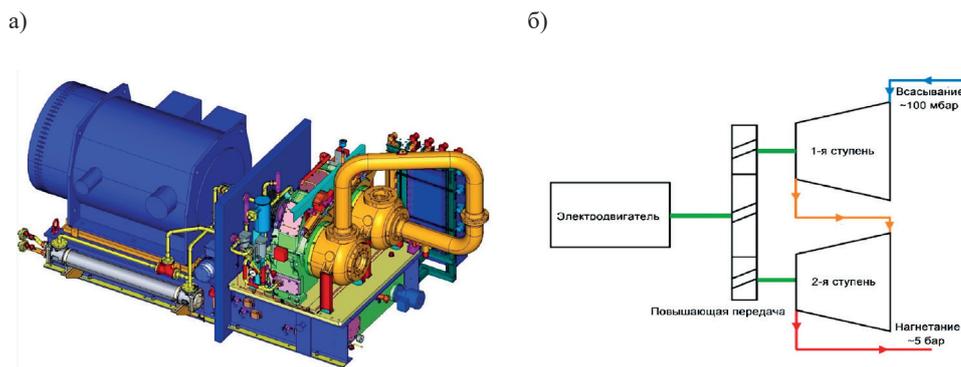


Рис. 3. Газовый компрессор фирмы Cryostar типа «CM2–200»:
 а — общий вид; б — принципиальная схема

Основные характеристики: давление на входе — ~100 мбар, давление нагнетания — 5 бар, температура на входе — не выше $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на выходе — не выше $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, частота вращения электродвигателя — 3580 об/мин, частота вращения ступеней компрессора — 29775 об/мин, мощность электродвигателя — 820 кВт, номинальная массовая подача — 6000 кг/ч. Для охлаждения газа после компрессора и подачи его в машинное отделение с рекомендованной температурой $+30 \dots +35\text{ }^{\circ}\text{C}$, на выходе из компрессора установлен трубчатый теплообменник After Cooler / Heater.

Для защиты ступеней компрессора от эрозии со стороны всасывания установлен влагоотделитель — NBO Mist Separator, имеющий сетчатое исполнение, в котором скорость газа при прохождении множественных слоев сетки снижается и частицы жидкости на них оседают, стекая в нижнюю часть влагоотделителя (Drain Pot), откуда впоследствии дренируются обратно в грузовой танк.

На входе во влагоотделитель установлен охладитель — Pre-cooler, который имеет следующее назначение: во-первых, поддержание достаточно низкой температуры газа перед компрессором; во-вторых, за счет поддержания достаточно низкой температуры, конденсация тяжелых углеводородов — производители двигателей рекомендуют поддерживать температуру перед влагоотделителем на уровне $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, что положительно отражается на МЧ подаваемого на двигателя газа. В охладителе установлены форсунки, которые мелкодисперсно распыляют СПГ внутри него, что позволяет качественно охладить подаваемый газ. СПГ в охладитель подается погружным насосом, установленным в грузовом танке.

В случае, когда расход газа на двигателях превышает нормальную интенсивность испарения СПГ (Normal Boil-Off Rate), для компенсации разницы между ними в работу может быть введен испаритель СПГ — Forcing Vaporizer (рис. 4), который представляет собой трубчатый теплообменник U-образного типа.

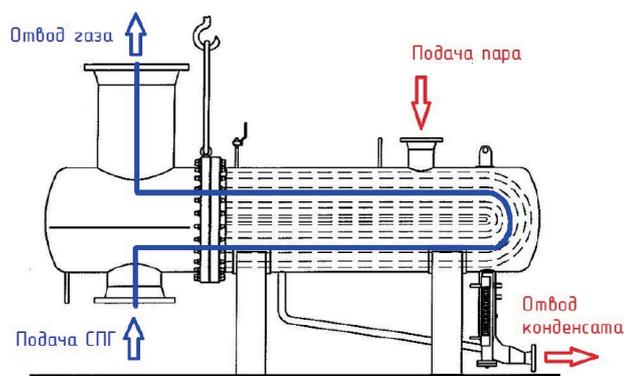


Рис. 4. Испаритель СПГ

Испарение СПГ осуществляется паром, подаваемым во внешний контур, подача сжиженного газа производится во внутренний контур (по трубкам). Производительность испарителя осуществляется изменением подачи СПГ через регулирующий клапан (Flow Control Valve — FCV). В данной конфигурации системы топливоподачи давление СПГ на входе в испаритель — ~ 8 бар, температура СПГ на входе в испаритель — $\sim -150\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление газа на выходе из испарителя — ~ 5 бар, температура газа на выходе из испарителя — $\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За испарителем установлен охладитель (Pre-cooler), задачей которого является понижение температуры газа до того уровня, когда все тяжелые углеводороды могут быть эффективно удалены во влагоотделителе (FBO Mist Separator). Влагоотделитель FBO Mist Separator, как и NBO Mist Separator, имеет сетчатое исполнение.

Сконденсированные углеводороды таким же образом дренируются обратно в грузовой танк. Температура во влагоотделителе поддерживается на уровне $\sim -110\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление — ~ 5 бар. За влагоотделителем установлен подогреватель газа (Fuel Gas Heater), имеющий конструкцию аналогичную испарителю СПГ. Температура на выходе из подогревателя поддерживается на уровне $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление на выходе — ~ 5 бар.

Далее через основной секущий клапан (Master Gas Valve — MGCV) газ подается в блоки регулирующей арматуры двигателей (Gas Valve Unit — GVU). В случае резкого снижения нагрузки на двигателях, для более плавного снижения производительности компрессоров и испарителя, избыточное давление из линии подачи газа на потребители будет сбрасываться обратно на вход во влагоотделитель через перепускной клапан (Overpressure Valve — OPV).

Эффективность топливоподготовки. Оценка эффективности топливоподготовки осуществлялась во время подготовки судна к постановке в сухой док. Для безопасной постановки судна на ремонт в док предварительно требуется во время предшествующей этому выгрузки откачать из его грузовых танков СПГ (насколько это максимально возможно), выпарить неоткачиваемый остаток, прогреть грузовые танки и их барьеры до положительной температуры, после чего произвести их инертнизацию и аэрацию.

Известно, что 5–10 % молярной массы СПГ составляют различные остаточные тяжелые углеводороды, такие как пропан, бутан, этан и др. [7], которые оказывают крайне негативное влияние на МЧ испаряющегося газа. Согласно проведенному исследованию [8] фирмы MAN Diesel & Turbo SE, проведенному на борту СПГ-танкера Castillo de Santisteban, метановое число композиции испаряющегося газа может значительно снижаться по мере увеличения интенсивности испарения остатков груза (рис. 5). Это связано с тем, что тяжелые углеводороды имеют более высокие температуры кипения, чем метан, и испаряются в последнюю очередь. Наихудшая композиция в данном исследовании имела значение МЧ, равное 73,2.

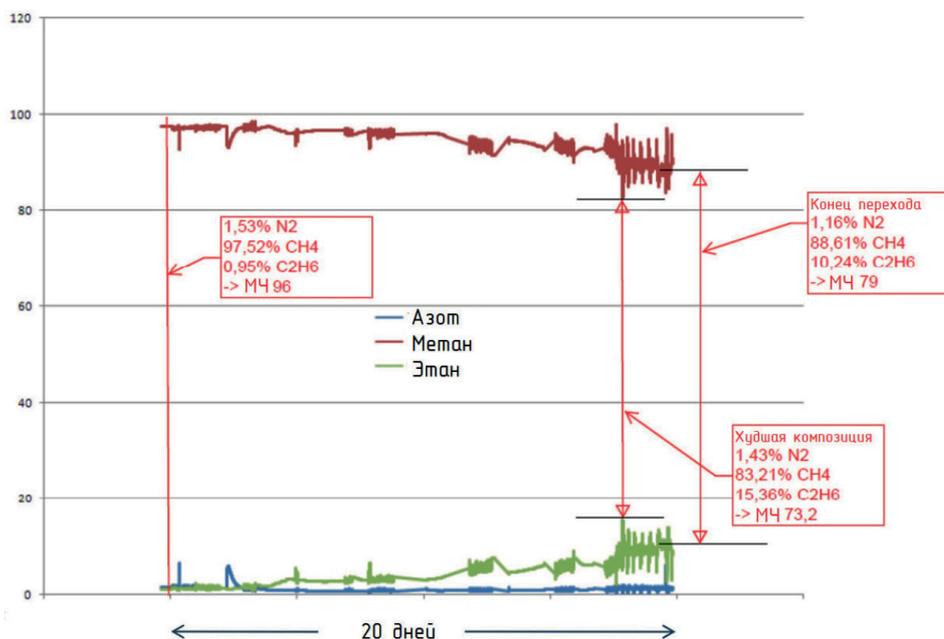


Рис. 5. Зависимость метанового числа от изменения композиции газа

После выгрузки оставшийся на борту СПГ использовался в течение продолжительного времени в качестве топлива для главных двигателей. Качество композиции подаваемого в машинное отделение газа контролируется газовым хроматографом Danalyzer™ 700XA фирмы Rosemount [9] — рис. 6. Пробоотборник, установленный непосредственно в линии подачи газа на главные двигатели, определяет композицию газа, полученную после топливоподготовки. Проба анализируемого газа берется через пробоотборник из линии подачи газа на потребители. Образец фильтруется и подается в анализатор для разделения на фракции и определения компонентов газа.

Хроматографическое разделение анализируемого газа на компоненты осуществляется следующим образом: точный объем анализируемого газа вводится в аналитическую колонну, содержащую неподвижную фазу (насадку), которая представляет собой либо активное твердое вещество, либо инертную твердую подложку, покрытую жидкой фазой (абсорбционное разделение). Исследуемый газ перемещается через колонну с помощью подвижной фазы (газа-носителя — He₂). В колонне происходит селективное замедление компонентов, в результате чего каждый компонент проходит через колонну с разной скоростью. Это позволяет разделить образец на составляющие его газы и пары.

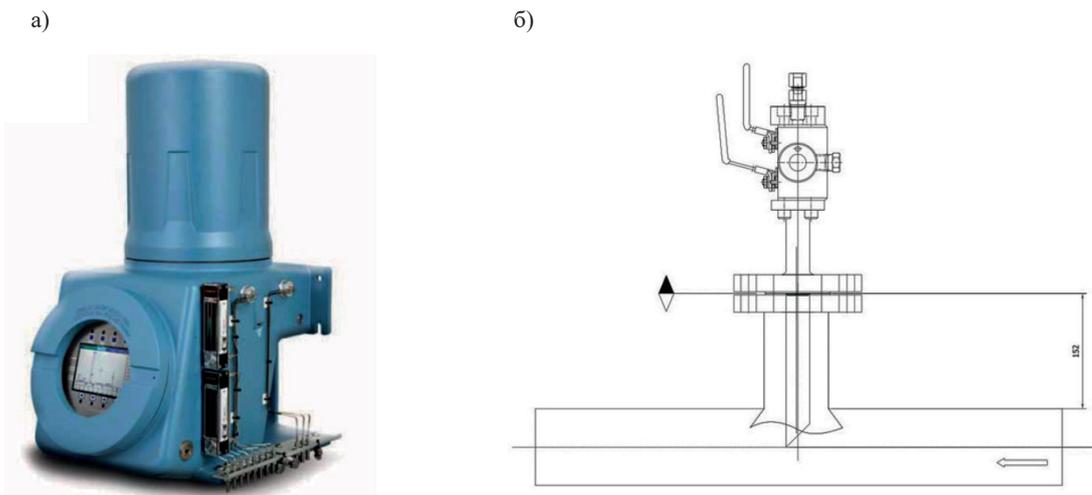


Рис. 6. Газовый хроматограф Danalyzer™ 700XA и пробоотборник:
а — общий вид хроматографа; б — устройство пробоотборника

Детектор, расположенный на выходе из аналитической колонки, определяет элюирование компонентов из колонны и выдает электрические сигналы, пропорциональные концентрации каждого компонента. Выходные сигналы выводятся на удаленный интерфейс.

Для анализа состава и качества газа, подаваемого на главные двигатели, использовались данные, полученные с хроматографа за последний час работы главных двигателей на газовом топливе до окончания выпаривания СПГ и остановки газовой топливоподготовки, а также основные рабочие параметры одного из ГД. Главный дизель-генератор Wartsila W9L50DF имеет следующие технические характеристики: диаметр цилиндра — 500 мм, ход поршня — 580 мм, номинальная мощность — 8775 кВт, частота вращения коленчатого вала — 514 мин⁻¹, среднее эффективное давление — 20 бар, удельный расход газа на номинальной нагрузке, равный 7258 кДж/(кВт·ч).

С целью оптимизации количества данных, используемых при исследовании, для всех параметров был определен коэффициент корреляции Пирсона [10] и отобраны только данные с сильной положительной или отрицательной связью относительно мощности двигателя (ENGINE_LOAD, RELATIVE_BMEP). Сильная отрицательная связь (-0,8308) была установлена для уровня открытия байпаса турбины турбокомпрессора (EXH_WASTE_GATE), сильная положительная связь — для температуры отработавших газов (ОГ) на входе в турбокомпрессор (ТК): EXH_GAS_TEMP_TC_INLET — 0,9139 (все рабочие параметры ТК имеют очень высокую степень корреляции друг с другом и с мощностью двигателя, соответственно, и далее представлены только этим параметром); максимальное рабочее сгорание в цилиндрах имеет приблизительно одинаковый уровень корреляции с мощностью двигателя и далее представлено только данными цилиндра № 1: PEAK_PRESSURE_CYL1-0,8915; аналогичная ситуация для температуры ОГ на выходе из рабочих цилиндров: EXH_GAS_TEMP_CYL1-0,8304. Также коэффициент корреляции Пирсона был определен для всех указанных ранее параметров, включая мощность двигателя относительно теплотворной способности газового топлива (MIXED_OUTLET_HEATING_VALUE) и визуализирован с помощью пакета seaborn. PairGrid [11], визуализация представлена на рис. 7, в левой нижней половине которого приведены графики плотности распределения значений, по диагонали — гистограммы распределения значений, в правой верхней половине — распределение значений с указанием коэффициента корреляции Пирсона.

Как видно из представленных на рисунке данных, за последний час работы главного двигателя на газовом топливе не произошло значимых изменений теплотворной способности газа, что свидетельствует о его качественной очистке от тяжелых углеводородов. Также теплотворная способность газа не имеет никаких значимых связей с рабочими параметрами двигателя (коэффициент корреляции Пирсона крайне низок, наибольшее значение 0,22).

Дополнительно была проанализирована композиция газа в начале и конце исследуемого периода. Данные с хроматографа были внесены в онлайн-калькулятор расчета МЧ [12]. Композиция газа в начале исследования: метан CH_4 — 97,45 моль %, этан C_2H_6 — 0,37 моль %, пропан C_3H_8 — 0,04 моль %, N-пентан $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ — 0,03 моль %, азот N_2 — 2,11 моль %, МЧ определенное по методике Wartsila (WMN) — 97, Propane Knock Index (PKI) — 0,3. Композиция газа в конце исследования: метан CH_4 — 97,44 моль %, этан C_2H_6 — 0,37 моль %, пропан C_3H_8 — 0,04 моль %, N-пентан $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ — 0,03 моль %, азот N_2 — 2,12 моль %, WMN — 97, PKI — 0,3. В обоих случаях МЧ композиции находится на довольно высоком уровне — 97, что свидетельствует о высоком качестве топливоподготовки.

Программный пакет AVL Boost™ [13] позволяет моделировать рабочий процесс двигателя с учетом качества используемого топлива. На основе данных о композиции газа в начале и конце исследования в утилите Gas Property Generator, встроенной в AVL Boost™, были рассчитаны характеристики газа, используемые далее для моделирования рабочего процесса. Характеристики газа в начале исследования: низшая теплота сгорания — 48971,88 кДж/кг, стехиометрическое соотношение воздух / топливо — 16,8565; характеристики газа в конце исследования: низшая теплота сгорания — 48976,67 кДж/кг, стехиометрическое соотношение воздух / топливо — 16,8582.

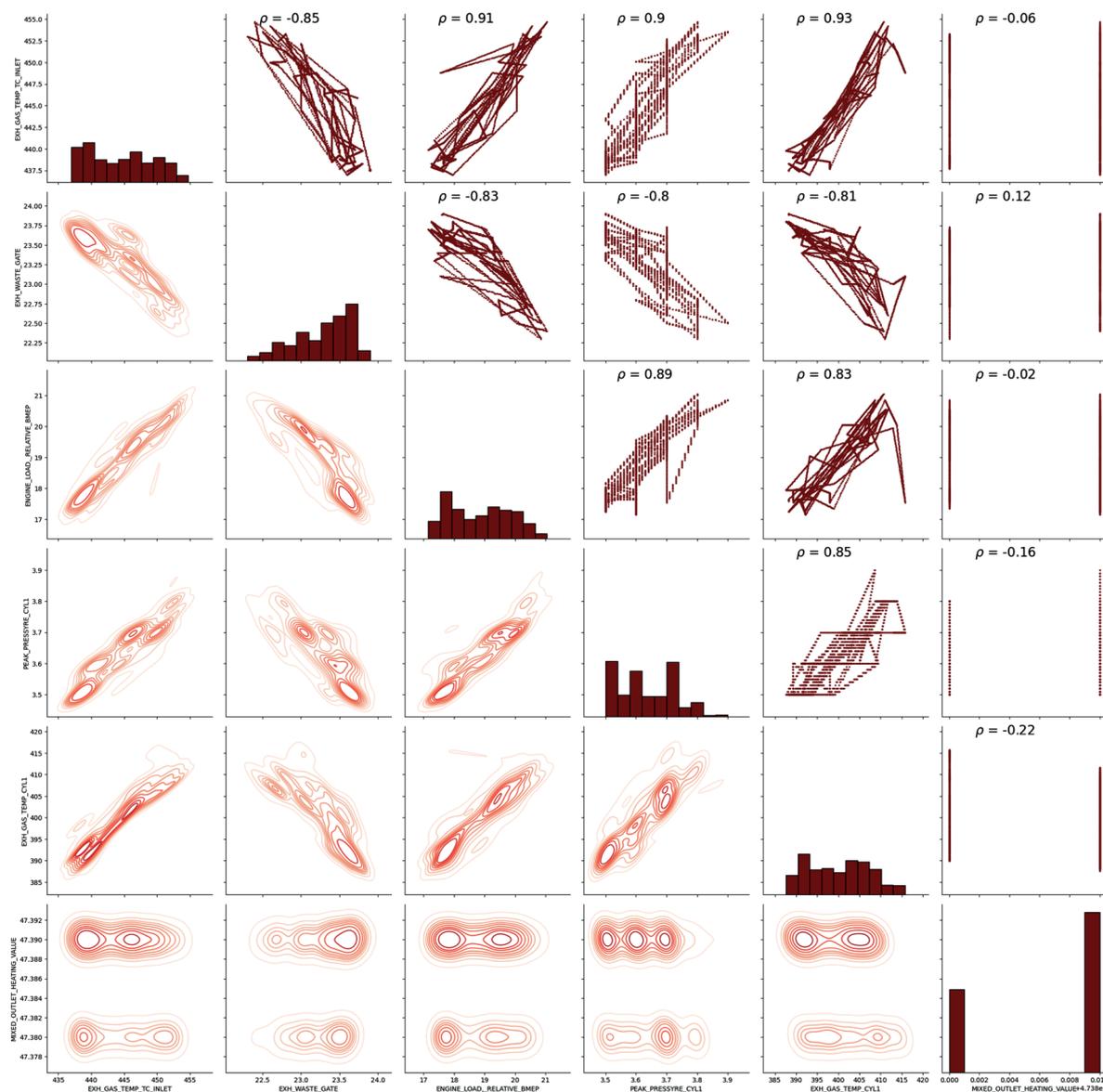


Рис. 7. Визуализация корреляции исследуемых параметров

Указанные характеристики газа использовались при моделировании рабочего процесса двигателя Wartsila W9L50DF (рис. 8). Изменение композиции газа не оказало влияния на удельный расход топлива.

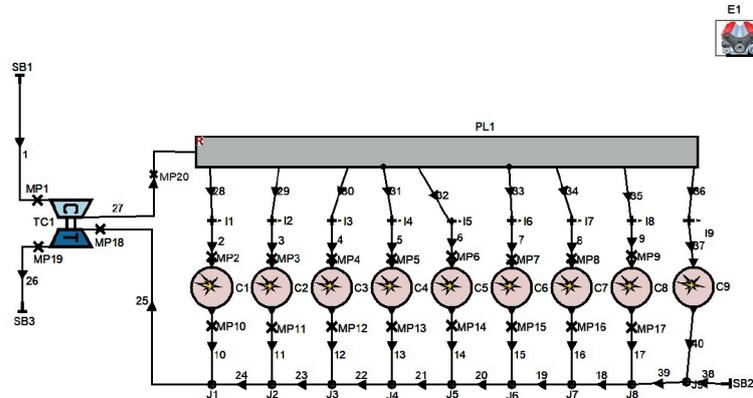


Рис. 8. Модель двигателя Wartsila W9L50DF в AVL Boost™

Дополнительным доказательством высокого содержания тяжелых углеводородов на входе в систему газовой топливоподдачи является тот факт, что окончание использования газа в качестве топлива для ГД в процессе выпаривания остатков груза было вызвано блокированием дренажа влагоотделителя (NBO Mist Separator) замерзшими гидрокарбонами, в результате чего в нем произошло повышение уровня отделенных жидких фракций, что привело к аварийной остановке газового компрессора. Таким образом, все ранее изложенные факты свидетельствуют о высоком уровне газовой топливоподготовки на СПГ-танкерах.

Топливоподготовка на судах, использующих СПГ в качестве топлива, но не являющихся газовозами. На фоне вступления в силу Кодекса МГТ и расширения применения СПГ в качестве топлива на современном рынке существует довольно большое количество систем газовой топливоподготовки (Fuel Gas Supply System — FGSS) от таких компаний, как DongHwa Entec [14], MAN ES [15], Kongsberg [16], Marine Service Noord [17], Mitsubishi Heavy Industries [18], Wartsila [19] и т. д. В зависимости от производителя конфигурация FGSS может быть различной и влагоотделитель в ней может как присутствовать, так и отсутствовать. Например, конфигурация FGSS от компании DongHwa Entec (рис. 9) схожа с газовой системой топливоподготовки СПГ-танкера, которая была рассмотрена ранее.

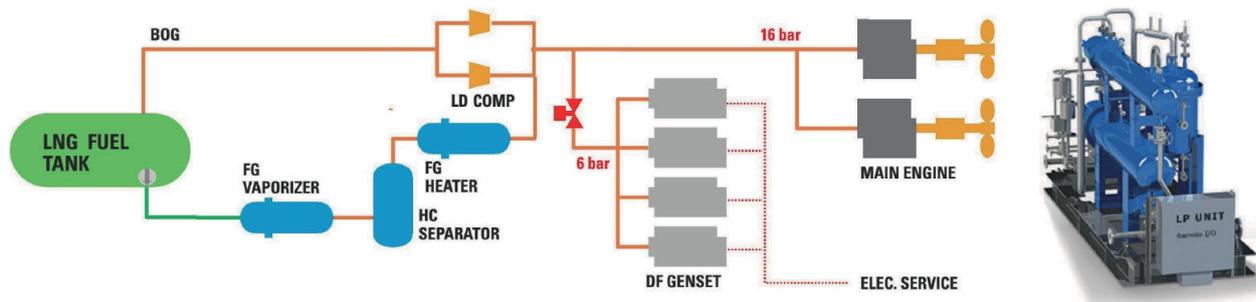


Рис. 9. Система газовой топливоподготовки

Испарившийся газ (Boil-off Gas — BOG) отбирается газовым компрессором (Low Duty Compressor — LD Comp) из бункерного танка с СПГ (LNG Fuel Tank) и подается на главные двигатели (в данном случае на двухтактные двигатели с системой подачи газа низкого давления типа WinGD X-DF [19] или MAN ME-GA [20]). От этих же компрессоров через редукционный клапан газ подается на дизель-генераторы судовой электростанции (Dual Fuel Generators Set — DF GenSet).

В случае, когда расход газа превышает нормальную интенсивность испарения СПГ, погружным насосом установленным в бункерном танке сжиженный газ подается на испаритель (Fuel Gas Vaporizer — FG Vaporizer), откуда он в газообразном состоянии поступает во влагоотделитель, где из него удаляются тяжелые гидрокарбонаты (Heavy Hydrocarbons Separator — HC Separator). Тяжелые углеводороды из влагоотделителя дренируются обратно в танк. После влагоотделителя газ проходит через подогреватель (Fuel Gas Heater — FG Heater) и направляется на главные двигатели. Теплоносителем для испарителя и подогревателя является 50%-й раствор моноэтиленгликоля в воде, который подогревается от системы охлаждения главных двигателей. Качество топливоподготовки данной системы аналогично используемой на СПГ-танкерах.

В системах с естественной циркуляцией сред, таких как LNGPac от компании Wartsila (рис. 10), влагоотделитель в конструкции системы газовой топливоподготовки не предусмотрен, так как нет возможности его дренирования обратно в бункерный танк, ввиду специфики работы системы. В основе системы лежит принцип поддержания давления внутри бункерного танка, необходимого для гарантированной подачи газа в рабочие цилиндры двигателя (5 бар для четырехтактных двухтопливных дизельных двигателей с системой подачи газа низкого давления, типа Wartsila DF [21], MAN DF [22] и т. д.). В системе установлен специальный теплообменник для поддержания давления в бункерном танке (Pressure Build-up Unit — PBU). Под давлением, создаваемым в танке, СПГ подается в однопроходный испаритель (Vaporizer — VAP), где переходит в газообразное состояние и подогревается до необходимой температуры для подачи в главные двигатели. Теплоносителем для теплообменника поддержания давления и испарителя, как и в предыдущем случае, является 50%-й раствор моноэтиленгликоля (Glycol Water — GW).

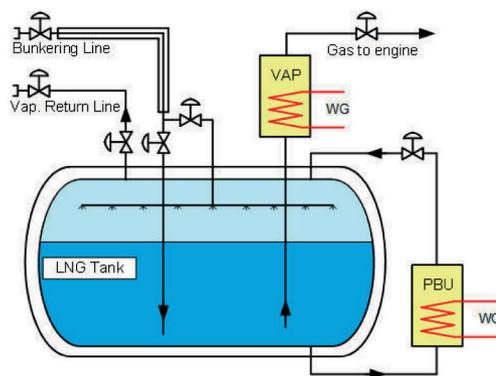


Рис. 10. Система типа LNGPac

С одной стороны, данный принцип построения FGSS значительно упрощает ее конструкцию и снижает стоимость, с другой — качество газа, подаваемого на ГД, будет очень сильно зависеть от изначальной композиции бункерного СПГ. В случае получения бункера с высокой долей тяжелых углеводородов отсутствует возможность производить очистку газа на выходе из танка, что может негативно сказаться на мощности, которую будут способны развить двигатели, так как, согласно рекомендациям производителей, при снижении МЧ ниже 80, эксплуатационная мощность (P_e) должна быть снижена на 1 % на каждую единицу метанового числа во избежание детонаций (knocking) в рабочих цилиндрах.

Заключение (Conclusion)

Современные системы газовой топливоподготовки способны обеспечить необходимый уровень качества топлива (в частности необходимый уровень МЧ) при нормальной эксплуатации судна и даже в ходе некоторых специфичных операций (например, как подготовка к постановке в сухой док). Однако вопрос утилизации тяжелых углеводородов, накопленных за время эксплуатации судна, актуальный для судов, не являющихся газовозами, остается открытым. Данную проблему можно

решить выдачей испарений тяжелых гидрокарбонатов на судно-бункеровщик при подготовке к получению СПГ (с их последующей утилизацией в специализированных установках) либо организацией процедуры их сжигания в судовых потребителях (например, во вспомогательных двухтопливных котлах) с учетом их специфики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LNG bunker fuel prices [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/> (дата обращения: 30.04.2023).
2. Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx) (дата обращения: 30.04.2023).
3. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx> (дата обращения: 30.04.2023).
4. Global fleet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sea-lng.org/why-lng/global-fleet/> (дата обращения: 30.04.2023).
5. 2021 was a record year for LNG fueled ships, says DNV [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://safety4sea.com/2021-was-a-record-year-for-lng-fueled-ships-says-dnv/> (дата обращения: 30.04.2023).
6. Tomasz Wlodek MSc P. E. Safety aspects of different composition liquefied natural gas storage processes / P. E. Tomasz Wlodek MSc // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 167–174.
7. Operational experience of the 51/60DF from MAN Diesel & Turbo [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dl-manual.com/doc/operation-manual-mz7811jprp07> (дата обращения: 30.04.2023).
8. Rosemount™ 700XA Gas Chromatograph [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-700xa-gas-chromatograph> (дата обращения: 30.04.2023).
9. Коэффициент корреляции Пирсона [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.codecamp.ru/blog/pearson-correlation-coefficient/> (дата обращения: 30.04.2023).
10. seaborn.PairGrid [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.PairGrid.html> (дата обращения: 30.04.2023).
11. Wärtsilä Methane Number Calculator [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/methane-number-calculator> (дата обращения: 30.04.2023).
12. BOOST™. Users Manual Version 2017. — AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL BOOST™ between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
13. DH-FGSS MEGI/XDF/DFDE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.dh.co.kr/ebook/leaflet_marine_DH-FGSS/index.html#page/1 (дата обращения: 30.04.2023).
14. The sophisticated world of LNG [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/lng-gas-supply-and-bunker-systems-eng.pdf?sfvrsn=b32d2eb5_1 (дата обращения: 30.04.2023).
15. LNG Fuel Gas Supply System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.kongsberg.com/contentassets/63bb1708808b4ece9f2bd9190edd49ac/468252_lng-fuel-gas-supply-system_091020.pdf (дата обращения 30.04.2023).
16. LNG fuel gas supply system (FGSS) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/lng-fuel-gas-supply-system/> (дата обращения: 30.04.2023).
17. LNG fuel gas supply system (LNG FGSS): components [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.mhi.com/products/ship/fgss_components.html (дата обращения: 30.04.2023).
18. Wärtsilä LNGPac [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac> (дата обращения: 30.04.2023).
19. Ott M. The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality / M. Ott, I. Nylund, R. Alder, T. Hirose, Y. Umemoto, T. Yamada // The 28th CIMAC World Congress 2016, Helsinki, Finland. — CIMAC, 2016. — Paper No. 233.

20. ME-GA — The latest dual-fuel MAN B&W two-stroke engine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/me-ga-eng.pdf?sfvrsn=b8afb1ad_3 (дата обращения: 30.04.2023).

21. Dual fuel engines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines> (дата обращения: 30.04.2023).

22. Providing the flexibility needed for reliable power generation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.man-es.com/energy-storage/products/dual-fuel-engines> (дата обращения: 30.04.2023).

REFERENCES

1. LNG bunker fuel prices. Web. 30 Apr. 2023 <<https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/>>.
2. Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI. Web. 30 Apr. 2023 <[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)>.
3. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx>>.
4. Global fleet. Web. 30 Apr. 2023 <<https://sea-lng.org/why-lng/global-fleet/>>.
5. 2021 was a record year for LNG fueled ships, says DNV. Web. 30 Apr. 2023 <<https://safety4sea.com/2021-was-a-record-year-for-lng-fueled-ships-says-dnv/>>.
6. Tomasz Wlodek MSc, P. E. “Safety aspects of different composition liquefied natural gas storage processes.” *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 4* (2016): 167–174.
7. Operational experience of the 51/60DF from MAN Diesel & Turbo. Web. 30 Apr. 2023 <<https://dl-manual.com/doc/operation-manual-mz781ljprpo7>>.
8. Rosemount™ 700XA Gas Chromatograph. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-700xa-gas-chromatograph>>.
9. Pearson’s correlation. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.codecamp.ru/blog/pearson-correlation-coefficient/>>.
10. seaborn.PairGrid. Web. 30 Apr. 2023 <<https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.PairGrid.html>>.
11. Wärtsilä Methane Number Calculator. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/methane-number-calculator>>.
12. BOOST™. Users Manual Version 2017. AVL List GmbH Graz, Austria, 2017. (License Agreement for Use of the Simulation Software AVL BOOST™ between Admiral Makarov SUMIS and AVL List GmbH, 2019).
13. DH-FGSS MEGI/XDF/DFDE. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.dh.co.kr/ebook/leaflet_marine_DH-FGSS/index.html#page/1>.
14. The sophisticated world of LNG. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/lng-gas-supply-and-bunker-systems-eng.pdf?sfvrsn=b32d2eb5_1>.
15. LNG Fuel Gas Supply System. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.kongsberg.com/contentassets/63bb1708808b4ece9f2bd9190edd49ac/468252_lng-fuel-gas-supply-system_091020.pdf>.
16. LNG fuel gas supply system (FGSS). Web. 30 Apr. 2023 <<https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/lng/fuel-gas-supply-system/>>.
17. LNG fuel gas supply system (LNG FGSS): components. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.mhi.com/products/ship/fgss_components.html>.
18. Wärtsilä LNGPac. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/lng-as-fuel/lngpac>>.
19. Ott, Marcel, Ingemar Nylund, Roland Alder, Takayuki Hirose, Yoshiyuki Umemoto, and Takeshi Yamada. “The 2-stroke low-pressure dual-fuel technology: from concept to reality.” *The 28th CIMAC World Congress 2016, Helsinki, Finland*. CIMAC, 2016. Paper No. 233.
20. ME-GA — The latest dual-fuel MAN B&W two-stroke engine. Web. 30 Apr. 2023 <https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync/me-ga-eng.pdf?sfvrsn=b8afb1ad_3>.
21. Dual fuel engines. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines>>.
22. Providing the flexibility needed for reliable power generation. Web. 30 Apr. 2023 <<https://www.man-es.com/energy-storage/products/dual-fuel-engines>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ватолин Дмитрий Сергеевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vatolinds@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vatolin, Dmitrii S. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vatolinds@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 4 мая 2023 г.
Received: May 4, 2023.*