

12. Королев В. И. Тенденции в развитии систем безопасности на плавучих объектах с ЯЭУ / В. И. Королев, А. Ю. Ластовцев, Д. А. Барышников // Науч.-техн. конф. проф.-преп. сост., науч. сотр. и курсантов: тез. докл. — Ч. 2. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — С. 65–67.

13. Королев В. И. Технические решения по недопущению выход теплоносителя в окружающую среду на Российских плавучих объектах с ЯЭУ / В. И. Королев, А. Ю. Ластовцев // Науч.-техн. конф. проф.-преп. сост., науч. сотр. и курсантов: тез. докл. — Ч. 2. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2012. — С. 63–65.

УДК 629.543+ 62-621.2

И. В. Чепалис,
асп.

ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ГАЗОДИЗЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННО ИСПАРИВШЕГОСЯ ГРУЗА МЕТАНОВОЗОВ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

PROBLEMS OF STABLE OPERATION OF DUAL FUEL ENGINES BY USING NATURAL BOIL-OFF GAS AS FUEL ON LNG CARRIERS

Рассмотрен один из эффективных методов утилизации испаряющегося груза метановозов — использование его в качестве топлива для газодизельного электрического пропульсивного комплекса. Ввиду чувствительности двигателей пропульсивного комплекса к качеству топлива, необходимо прогнозирование их устойчивой работы, что определяет надежность утилизации паров груза и стабилизацию давления в грузовых танках. Обоснованы критерии качества газа и их допустимые пределы, прояснены причины отказов газодизелей при содержании значительного количества азота в естественно испарившемся грузе. Объяснены проблемы смазки газодизелей при компенсации недостающей мощности за счет сжигания остаточных и дистиллятных сортов топлива в газодизелях. Выбран критерий оценки баланса испарения/потребления газа. Представлены качественные зависимости баланса теплоты от состава испаряющегося груза при изменении суточного коэффициента испарения для метановоза объемом грузовых танков 155000 м³.

One of the efficient methods of boil-off gas treatment - it's usage as a fuel for dual fuel diesel electric propulsion of LNG carrier was reviewed. Because of dual fuel engines are sensitive to gas fuel quality, forecast of stable operation is required, this defines reliable utilization of boil-off gas and cargo tanks pressure stabilization. Gas quality criteria and permissible range were grounded; dual fuel engine failures due to high nitrogen content in boil-off gas were explained. Lubrication problems of dual fuel engines due to power compensation by using heavy fuel oil and marine diesel oil as a fuel were explained. Criterion for evaluation balance of evaporated/consumed gas was chosen. Quality graphs of heat balance and boil-off gas composition by varying boil-off rate for LNG carriers with a cargo tank capacity of 155,000 m³ were showed.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), метановоз, газодизельный электрический пропульсивный комплекс, низшая теплота сгорания, естественно испарившийся груз (ЕИГ).

Key words: liquefied natural gas (LNG), liquefied natural gas carrier (LNGC), dual fuel diesel electric (DFDE), inferior calorific value, natural boil-off gas.



ЭФФЕКТИВНЫМ методом стабилизации давления в грузовых танках метановозов является использование в энергетической установке судна испаряющегося груза в качестве топлива. Изначально метод был реализован на паротурбинной установке (ПТУ), где испарившийся газ сжигался в котле. В 2006 г. газодизельный электрический пропульсивный комплекс был установлен на ряд метановозов компании Gaz de France и BP Shipping [1]. В настоящее время

ситуация рынка сжиженного природного газа (СПГ) представляет собой рост спотовых поставок и контрактов длительностью 1–4 года, достигших четверти всех объемов продажи СПГ [2]. В данной ситуации применение газодизельного электрического пропульсивного комплекса (ГДЭПК) на метановозах является наиболее целесообразным, так как обеспечивает экономическую гибкость как в выборе вида топлива, так и в соотношении его расхода. На рис. 1 приведена диаграмма соотношения пропульсивных комплексов существующего и строящегося на период 2014–2018 гг. метановозного флота [3], [14]. Как можно заметить, 70 % строящихся метановозов будет оборудовано ГДЭПК.

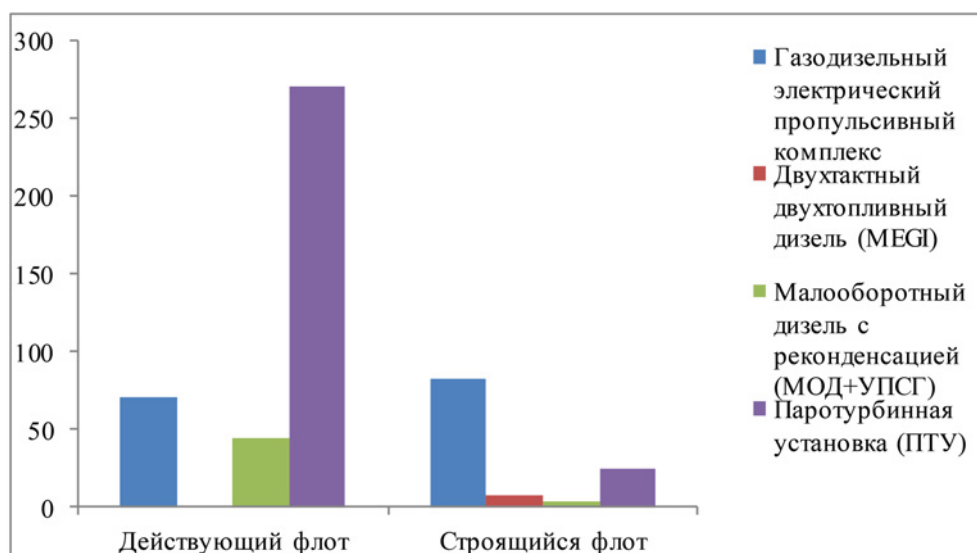


Рис. 1. Диаграмма соотношения пропульсивных комплексов метановозов

На рис. 2 приведена типичная принципиальная схема ГДЭПК метановоза стандартного размера (155000 м³), откуда видно, что основными элементами данного комплекса являются газодизели, генераторы, трансформаторы, инверторы и электродвигатели постоянного тока, непосредственно передающие крутящий момент на гребной винт.

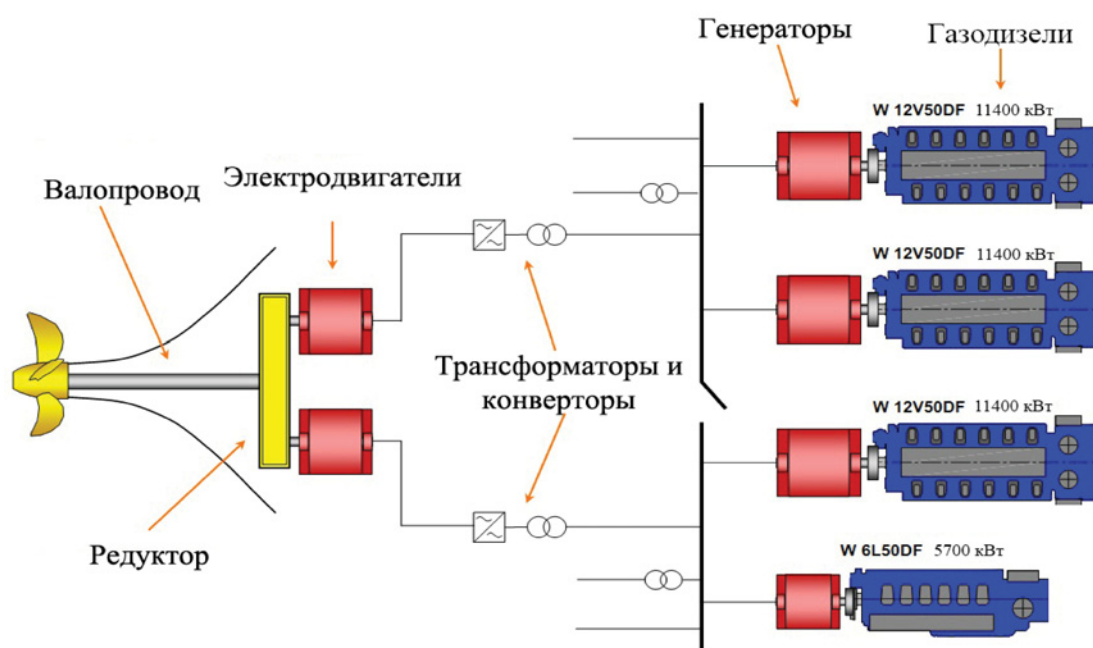


Рис. 2. Принципиальная схема газодизельного электрического пропульсивного комплекса

К преимуществам ГДЭПК относятся следующие:

- полная независимость числа первичных дизелей от числа винтов и возможность работы любых главных дизель-генераторов (ДГ) на любой винт;
- способность к саморегулированию по крутящему моменту при изменяющемся сопротивлении движению судна;
- удобство осуществления парциальной работы, что повышает экономичность на малых и средних ходах судна;
- использование ДГ для удовлетворения всех нужд судна в электроэнергии [4];
- ремонтпригодность двигателей без нарушения режима движения судна.

Регулирование вырабатываемой мощности электростанции происходит ступенчато, посредством пуска/остановки необходимого количества ДГ, в зависимости от нагрузки главного распределительного щита. При оптимальном распределении нагрузки между генераторами, первичные двигатели (газодизели) работают на номинальном режиме с максимальным КПД и минимальным удельным расходом топлива.

Опыт эксплуатации метановозов с ГДЭПК судоходной компанией «GDF Suez» отражен в [5]. Отмечается, что после погрузки молярная доля азота в естественно испарившемся грузе (ЕИГ) достигала $x_{N_2} \approx 30\%$. По этой причине, во избежание пропуска воспламенения в цилиндрах, давление газа и длительность открытия газового впускного клапана были увеличены для обеспечения достаточного количества метана в цилиндре. Основными условиями устойчивой работы газодизеля является обеспечение газозоудшной смеси в концентрационных пределах воспламенения и избежание режима детонационного горения смеси [6].

Ввиду особенностей газодизельного цикла, двигатели комплекса чувствительны к качеству газового топлива, состав и объемы которого непостоянны на различных фазах рейса. Прогнозирование устойчивой работы газодизелей определяет надежность использования ЕИГ в качестве топлива как метода стабилизации давления в грузовых танках. Необходимо обосновать критерии качества газа, их допустимые пределы и прояснить физику отказов газодизелей.

В табл. 1 приведены технические характеристики газового топлива для наиболее распространенного на метановозах газодизеля Wärtsilä 50DF.

Таблица 1

Основные технические характеристики газового топлива газодизеля Wärtsilä 50DF

Параметр	Единицы измерения	Величина
Массовая низшая теплота сгорания, min	МДж/кг	39,5
Метановое число, min		80
Содержание метана, min	%	70

Низшая теплота сгорания. Из теплового расчета газодизеля Wärtsilä 12V50DF получен график коэффициента снижения эффективной мощности k_{N_e} в зависимости от давления газа, p_a перед газовым впускным клапаном для различных массовых низших теплотворных способностей газового топлива (рис. 3). Очевидно, что понижение теплотворности испаряющегося груза необходимо компенсировать повышением давления газа перед впускным клапаном газодизеля. Однако такого рода повышение допустимо до определенного критического значения, определяемого двумя ограничениями: максимальным давлением компрессора грузовых паров, которое составляет 5,5 кгс/см², и минимальным содержанием метана.

Метановое число определяет детонационную стойкость газового топлива. Ввиду того, что состав ЕИГ представляет собой метано-азотную смесь, метановое число $MN \geq 80$.

Содержание метана, min. Газовая смесь, поступающая в цилиндр газодизеля, при степени сжатия $\epsilon = 12$ характеризуется значительным по величине коэффициентом избытка воздуха α , равным для смеси газа и воздуха 1,4–2,2. Выбор меньше указанной величины может привести к

самовоспламенению смеси в процессе сжатия [7]. Понижение содержания метана в газозвушной смеси приведет к росту коэффициента избытка воздуха, так как количество воздуха для сгорания остается постоянным. Ввиду этого при некотором минимально критическом содержании метана в ЕИГ произойдет пропуск воспламенения в цилиндре. Это обусловлено тем, что снижение содержания метана выведет смесь за нижний концентрационный предел воспламенения.

Концентрационный диапазон воспламенения метана при давлении в конце сжатия $p_c = 110 \text{ кгс/см}^2$ составляет 5,64–42 % [8]. При этом предельные значения коэффициентов избытка воздуха составляют 1,74 и 0,143 соответственно. ΔABC — множество точек, характеризующих допустимый состав метановоздушной смеси в цилиндре газодизеля (рис. 4). Ребра треугольника — ограничительные прямые: AC — нижний концентрационный предел; BC — минимально допустимый коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,4$; AB — соотношение $N_2/O_2 = 3,78$ в наддувочном воздухе. Если допустить, что двигатель работает на смеси $CH_4 = 7,14 \%$, $O_2 = 19,51 \%$, $N_2 = 73,35 \%$, $\alpha = 1,4$ (точка B), то повышение молярной доли азота x_{N_2} в ЕИГ будет сдвигать состав смеси к точке D , пока не выведет смесь за нижний концентрационный предел воспламенения, что приведет к пропуску воспламенения в цилиндре.

Разбавление горючей смеси инертными примесями сужает область воспламенения вплоть до превращения смеси в невоспламеняющуюся [9]. В этой ситуации система автоматического управления произведет автоматическое переключение газодизелей на резервную топливную систему с использованием жидкого топлива (остаточного (HFO) или дистиллятного (MDO)). Это означает, что при $x_{CH_4} < 70 \%$ использование ЕИГ в качестве топлива не может быть применено в качестве метода стабилизации давления в грузовых танках. В данном случае его необходимо утилизировать другим методом (реконденсация, сжигание в топочном устройстве, вентиляция). Производить это необходимо до тех пор, пока молярная доля азота в парах груза не станет $x_{N_2} < 30 \%$.

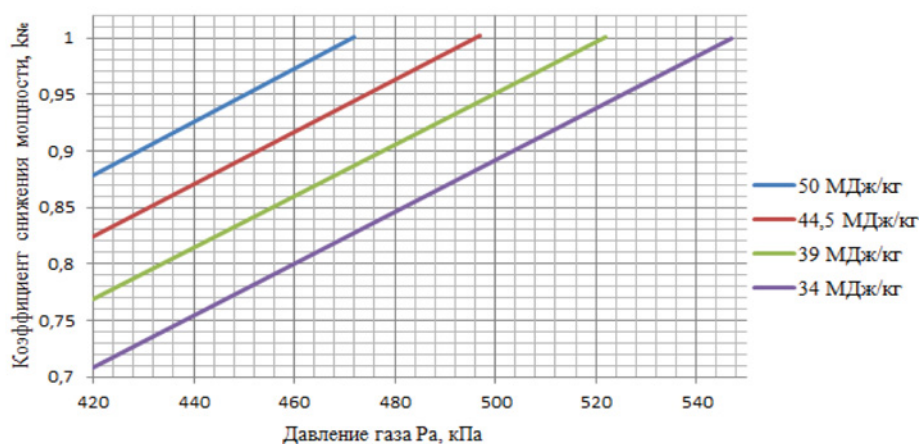


Рис. 3. Зависимость коэффициента снижения эффективной мощности газодизеля от давления газа с различной теплотворностью

Перевод газодизелей на остаточное топливо (HFO) влечет за собой не только проблемы утилизации ЕИГ, но и проблему смазки двигателя. Согласно рекомендациям изготовителя, в двигателе можно использовать топливо остаточного сорта вплоть до RMK 700 (ISO 8215:2005), что означает содержание серы до 4,5 %. Нейтрализация воздействия образующейся в цилиндрах серной кислоты и продуктов окисления самого масла достигается путем введения в него присадок, придающих ему щелочные свойства. Эффективность воздействия присадок определяется щелочным числом, выраженным в мг КОН/г масла [10]. По данным «Wärtsilä», требования к щелочному числу смазочного масла лежат в пределах 6–12 для работы двигателя на газе, 12–20 для работы на дистиллятном топливе, 30–55 для работы на остаточном топливе. Ввиду того, что в тронковых дизелях смазка втулки происходит разбрызгиванием, при переходе двигателя на топливо с более высоким содержанием серы требуется замена масла в картере на масло с соответствующим щелочным числом.

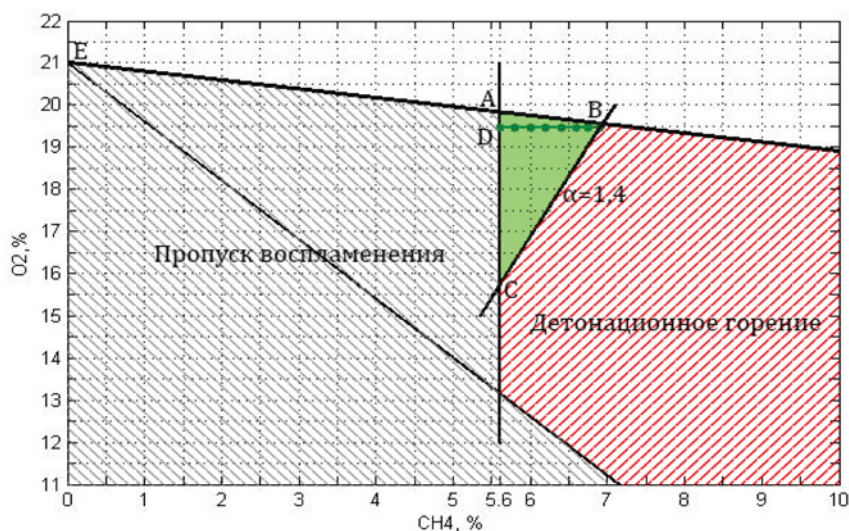


Рис. 4. Допустимый состав газовой смеси
в концентрационном диапазоне воспламенения метана

Смазочное масло для работы на газе совместимо только для работы двигателя на топливе с содержанием серы $\leq 1\%$. В противном случае при взаимодействии масла с топливом на стенках втулки формируются отложения смолисто-асфальтовых веществ, карбенов и карбоидов в виде лаков и нагаров. Эти отложения остаются в раскаленном состоянии, что может привести к преждевременному зажиганию газовой смеси и детонационному режиму горения в цилиндре при переводе двигателя на газ.

При переводе двигателя на газ необходимо осуществить замену смазочного масла на соответствующее. Более того, для выгорания отложений, образованных при работе газодизеля на остаточном топливе (HFO), необходимо, чтобы двигатель проработал не менее двух часов на дистиллятном топливе (MDO) на нагрузке $\geq 60\%$ от номинальной.

Для оценки устойчивой работы комплекса необходимо обладать информацией о количестве и качестве ЕИГ, требуемой от главного распределительного щита мощности, т. е. о некотором балансе/дисбалансе этих величин. Наиболее информативной физической величиной в данном случае является количество теплоты Q , Дж. Количество теплоты ЕИГ характеризует как суточный объем испарившегося груза, так и его теплотворность, которая косвенным образом информирует о составе паров груза:

$$Q_{\text{ЕИГ}} = e \cdot V_{100\%} \cdot l \cdot \rho_{\text{СПГ}} \cdot \hat{H}, \quad (1)$$

где e — суточный коэффициент испарения СПГ; $V_{100\%}$ — объем грузовых танков; l — коэффициент заполнения танков; $\rho_{\text{СПГ}}$ — плотность груза; $\hat{H}$ — массовая низшая теплота сгорания груза.

Требуемое количество теплоты пропорционально мощности и удельному расходу газового топлива при определенной нагрузке двигателя:

$$Q_{\text{треб}} = N_e \cdot g_e \cdot 24. \quad (2)$$

В зависимости от режима хода судна и погодных условий потребляемая мощность будет варьироваться. Проведем анализ на примере метановоза стандартного размера.

Основные характеристики:

- объем грузовых танков $V_{100\%} = 155000 \text{ м}^3$;
- мощность электростанции: 39,9 МВт ($3 \times 11400 \text{ кВт} + 5700 \text{ кВт}$);
- грузовая система MARK III, суточный коэффициент испарения груза $e = 0,0015$;

Основные электропотребители:

- главные электродвигатели 25,3 МВт (2×12650 кВт);
- компрессор газового топочного устройства (ГТУ) 855 кВт;
- компрессор подачи ЕИГ к газодизелям 769 кВт;
- насосы забортной воды 110 кВт;
- насос охлаждения низкотемпературного контура 110 кВт;

Потребляемая мощность варьируется в зависимости от режима движения метановоза (табл. 2) [11].

Таблица 2

Потребляемая мощность для различных фаз рейса

Стадия рейса	Потребляемая мощность
Переход в грузу или балласте (спокойное море)	32 МВт
Переход (бурное море)	27 МВт
Маневрирование	14 МВт
Стоянка на якоре, дрейф	1,5 МВт
Погрузка	4 МВт
Выгрузка	7,5 МВт

Для количественной оценки дисбаланса теплоты рассмотрим случай, когда метановоз совершил погрузку и вышел на эксплуатационную скорость 18 уз. При этом примем, что корпус судна чистый, высота волны 1 м, скорость ветра 1 м/с. При таких условиях потребляемая мощность составит 27 МВт. Для выработки мощности 27 МВт в параллельной работе необходимы три генератора 12V50DF, при этом нагрузка каждого из них будет составлять $Load = \frac{27000 \text{ кВт}}{3 \cdot 11700 \text{ кВт}} \cdot 100 \% = 77 \%$.

Для режима 77 %-й нагрузки удельный расход газового топлива $g_e = 7390 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$.

$$Q_{\text{треб}} = \frac{27000 \text{ кВт} \cdot 7390 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \cdot 24 \text{ ч}}{1000} = 4788720 \frac{\text{МДж}}{\text{сут}}$$

Примем суточный коэффициент испарения груза, согласно заявленной производителем «Gaztransport» грузовой системы MARK-III, $e = 0,0015$. Также допустим, что пары груза будут содержать исключительно метан. Тогда массовая низшая теплота сгорания составит [12]:

$$\hat{H}^0 [0^\circ \text{C}] = \sum_{j=1}^N \left(x_j \cdot \frac{M_j}{M} \right) \cdot \hat{H}_j^0 (0^\circ \text{C}); \quad (3)$$

$$\hat{H}_{\text{CH}_4}^0 [0^\circ \text{C}] = \frac{802820 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}}{16,043 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}} = 50,042 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

Соответственно

$$Q_{\text{исп}} = 0,0015 \text{ сут}^{-1} \cdot 155000 \text{ м}^3 \cdot 0,98 \cdot 459,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 50,041 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} = 5238085,99 \frac{\text{МДж}}{\text{сут}}$$

Дисбаланс испарившегося и требуемого количества теплоты будет равен их разности:

$$\Delta Q = Q_{\text{исп}} - Q_{\text{треб}}; \quad (4)$$

$$\Delta Q = 5238085,99 \frac{\text{МДж}}{\text{сут}} - 4788720 \frac{\text{МДж}}{\text{сут}} = 449365,99 \frac{\text{МДж}}{\text{сут}}$$

Рассматриваемый случай позволяет дать количественную оценку дисбаланса теплоты для идеальных условий. Однако ΔQ — величина, в которую входят времязависимые переменные. Заявленный производителем суточный коэффициент испарения СПГ, $e = 0,0015$ является величиной ожидаемой, он зависит от ряда факторов, таких как температура СПГ при погрузке, состав СПГ, волнение моря, температура окружающей среды, состояние корпуса и т. д. Массовая низшая теплота сгорания груза $\dot{H}$ не может быть принята постоянной величиной. Начиная от погрузки на ожижительном заводе и заканчивая выгрузкой на приемном терминале, ЕИГ представляет собой смесь наиболее низкокипящих и летучих элементов СПГ — азота и метана. Теплопритоки из окружающей среды приводят сначала к испарению азота, как самого низкокипящего компонента, а затем — метана [13]. Этот факт оказывает существенное влияние на теплотворность ЕИГ, происходит уменьшение низшей теплоты сгорания.

На рис. 5 приведен график зависимостей $\Delta Q(\dot{H})$ для различных значений коэффициента испарения e . Нетрудно заметить, что отклонение коэффициента испарения на 0,0002 оказывает весомое влияние на ΔQ . Если $\Delta Q > 0$, то это количество теплоты необходимо утилизировать другим методом (реконденсацией, сжиганием в ГТУ, вентиляцией), $\Delta Q < 0$ — необходим пуск резервного генератора, работающего на НФО, так как фрахтователь зачастую не позволяет принудительно испарять груз для компенсации необходимого количества потребляемой энергии.

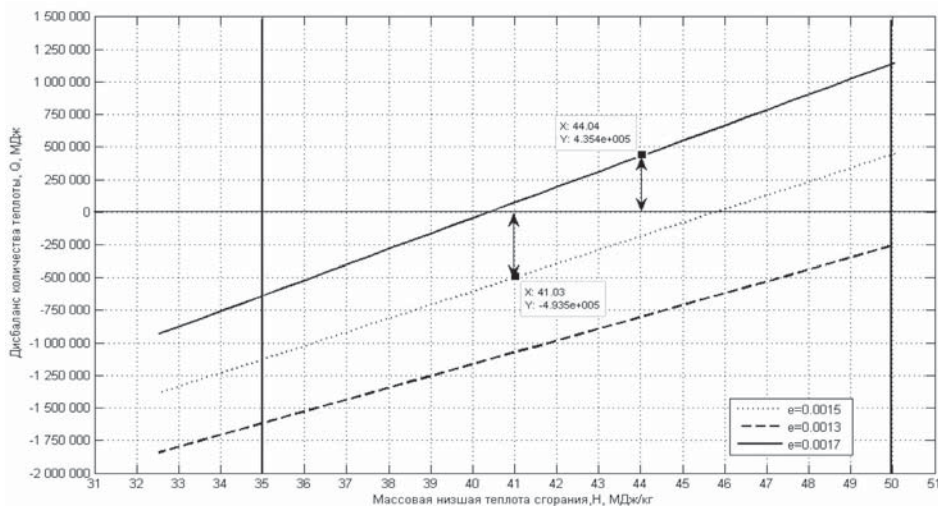


Рис. 5. Зависимости $\Delta Q(\dot{H})$ для различных значений коэффициента испарения e

Из графика видно, что при коэффициенте испарения $e=0,0017$ и $\dot{H}=44$ МДж/кг (содержание $N_2 = 12\%$), $\Delta Q = 435400$ МДж. При данных характеристиках испаряющегося груза дополнительной утилизации подлежат 9,9 т/сут СПГ, а при коэффициенте испарения $e=0,0015$, $\dot{H}=46$ МДж/кг, что соответствует $x_{N_2} = 8\%$, количество теплоты испарившегося газа и требуемое количество теплоты равны: $Q_{\text{исп}} = Q_{\text{треб}}$.

Дальнейшее увеличение содержания азота в ЕИГ при $e=0,0015$ приведет к уменьшению теплотворности газового топлива, что, в свою очередь, снизит эффективную мощность газодизелей. Соответственно потребуется компенсировать данный дисбаланс теплоты путем введения в параллельную работу резервного генератора на НФО. В резерве находится генератор 6L50DF мощностью 5700 кВт, которая является максимальной для компенсации резервного генератора. В случае превышения данной мощности потребуется перевод одного из основных генераторов на НФО.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Оценка баланса испарение — потребление газа посредством количества теплоты позволяет анализировать эффективность утилизации испаряющегося груза.
2. Чувствительность газодизелей к качеству газа требует прогноза информации об ЕИГ. В случае недостатка теплоты ЕИГ необходима компенсация за счет сжигания НФО, что, порой, представ-

ляет трудности в связи со смазкой двигателей. В случае переизбытка ЕИГ или отказа газодизелей придется прибегнуть к нерациональной утилизации паров груза посредством ГТУ или вентиляции.

3. Для количественной оценки утилизации испаряющегося груза необходима информация о зависимостях количества теплоты ЕИГ от времени, что позволит анализировать динамику изменения баланса теплоты.

Список литературы

1. Чепалис И. В. Повторное сжижение газов, как метод стабилизации давления в грузовых танках метановозов / И. В. Чепалис, Н. А. Козьминых // Судовые энергетические установки. — 2014. — № 33. — С. 41–48.
2. Выгон Г. В. Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России / Г. В. Выгон, М. Белова // Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2013. — С. 2.
3. The world's newest LNG carriers // LNG shipping news. — 2014. — P. 6–7.
4. Пахомов Ю. А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания / Ю. А. Пахомов. — М.: ТрансЛит, 2007. — 528 с.
5. Jean-François Castel, Jérémie Leriche. Feedback on the operation of the dual fuel diesel electric propulsion on LNG carriers: impact of gas fuel quality on propulsion efficiency.
6. Arto Sarvi, Jorma Jokiniemi, Jussi Lyyräinen, Ron Zevenhoven. Combustion in dual fuel gas engines. The effect of LCV-gases and detonation sensitivity // International Flame Research Foundation. — Naantali, Finland. — 2009. — 17 p.
7. Ваншейдт В. А. Дизели / В. А. Ваншейдт. — Л.: Машиностроение, 1964. — 600 с.
8. Фастовский В. Г. Метан / В. Г. Фастовский. — М.: Гостолтехиздат, 1947. — 156 с.
9. Талантов А. Е. Основы теории горения. / А. Е. Талантов. — Казань: Ротапринт КАИ, 1975. — 253 с.
10. Возницкий И. В. Практические рекомендации по смазке судовых дизелей / И. В. Возницкий. — СПб.: Моркнига, 2007. — 64 с.
11. Michael Wenninger, Sokrates Tolgos. LNG carrier power Flexibility and Maintainability with 51/60 DF electric propulsion MAN Diesel SE. Augsburg, Germany, 2008. — 22 с.
12. ГОСТ 31369-2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. — М.: Стандартинформ, 2009. — 59 с.
13. Чепалис И. В. Анализ последствий и критичности отказов установок повторного сжижения газов судов-метановозов / И. В. Чепалис, Н. А. Козьминых // Технические газы. — 2014. — № 3. — С. 38–42.
14. Костылев И. И. Зарубежное судостроение. Состояние и тенденции / И. И. Костылев, М. К. Овсянников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 66–70.

УДК 662.76.004.14:621.436

Л. А. Хлюпин,
канд. техн. наук, доц.

СХЕМЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ КАПТИРОВАННОГО ГАЗА ДЛЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ

SCHEME OF COOKING CAPTURED GAS FOR GAS-DIESEL ENGINE

Выполнены исследования в обеспечение практической реализации расширения ассортимента газового топлива для газодизелей за счет использования каптированного газа, который в больших объемах