

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОТКАЗА ОТ УПСГ НА СПГ-ТАНКЕРАХ

Голубев Р.О. Email: Golubev1151@scientifictext.ru

Голубев Роман Олегович – бакалавр, магистрант,
кафедра судовых энергетических установок систем и оборудования,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация: описана принципиальная схема бортовой установки повторного сжижения газа СПГ-танкера и определена её мощность для стандартных и супер-СПГ-танкеров. Выявлены факторы, определяющие эффективность её применения на этом типе судов. Определена степень влияния УПСГ на эффективность судовой энергетической установки. Установлен характер зависимостей. Исследован способ отказа от УПСГ путём повышения скорости хода судна. Сделаны выводы о рациональности способа для СПГ-танкеров с единой электроэнергетической системой и с главными малооборотными двигателями.

Ключевые слова: единая электроэнергетическая система (ЕЭЭС), малооборотный двигатель (МОД), сжиженный природный газ (СПГ), судовая энергетическая установка (СЭУ), установка повторного сжижения газа (УПСГ).

ANALYSIS OF TERMS OF REFUSAL OF UPSG ON LNG TANKERS

Golubev R.O.

Golubev Roman Olegovich – Bachelor of Science, Undergraduate,
DEPARTMENT OF MARINE POWER PLANTS SYSTEMS AND EQUIPMENT,
SAINT PETERSBURG STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY, SAINT PETERSBURG

Abstract: LNG carrier's principle diagram of onboard reliquefaction plant is described and formulas for its power calculation are given. The conditions of its efficient application at this ship type are defined. The formulas for reliquefaction plant's influence calculation upon efficiency of ship's power plant are surveyed and its extent is measured. The method of reliquefaction plant exclusion by the ship speed increase is explored. Rationality of this method is analysed separately for LNG carriers equipped with integrated electric propulsion system and with low-speed main engines.

Keywords: integrated electric propulsion system, low-speed engine, liquefied natural gas (LNG), marine power plant, reliquefaction plant.

УДК 621.592.3

Описание объекта исследования

УПСГ применяются на СПГ-танкерах с целью максимизации полезной грузовместимости судна. Они обеспечивают повторное сжижение СПГ, перевозимого при значительной разнице температур с окружающей средой. Для СПГ-танкеров эта разница превышает 100 градусов.

Включение УПСГ в состав СЭУ – это одно из наиболее сложных решений, принимаемых проектантом, т.к. на эффективности её применения сказывается множество переменных факторов:

- Целесообразность применения УПСГ зависит от стоимости перевозимого природного газа (ПГ), которая от года к году изменяется в широком диапазоне;
- Мощность УПСГ должна соответствовать качеству изоляции системы удержания груза – иметь производительность, соответствующую суточной доле испарений груза;
- Последняя увеличивается с ухудшением погодных условий – повышение температуры груза при его движении в грузовых танках;
- Мощность УПСГ должна соответствовать режиму эксплуатации пропульсивной установки (ПУ), от чего зависит количество ПГ, не востребованное энергетической установкой и требующее сжижения;
- УПСГ не должна перегружать судовую электростанцию (СЭС) на эксплуатационных режимах, что требует особого внимания, поскольку, даже при частичной загрузке УПСГ, её мощность составляет примерно 50% от мощности СЭС.

На рис. 1 показана схема УПСГ, работающей по обратному циклу Брайтона, применяемой на супер СПГ танкерах. Графики реализуемых холодильных циклов приведены в [6, с. 82].

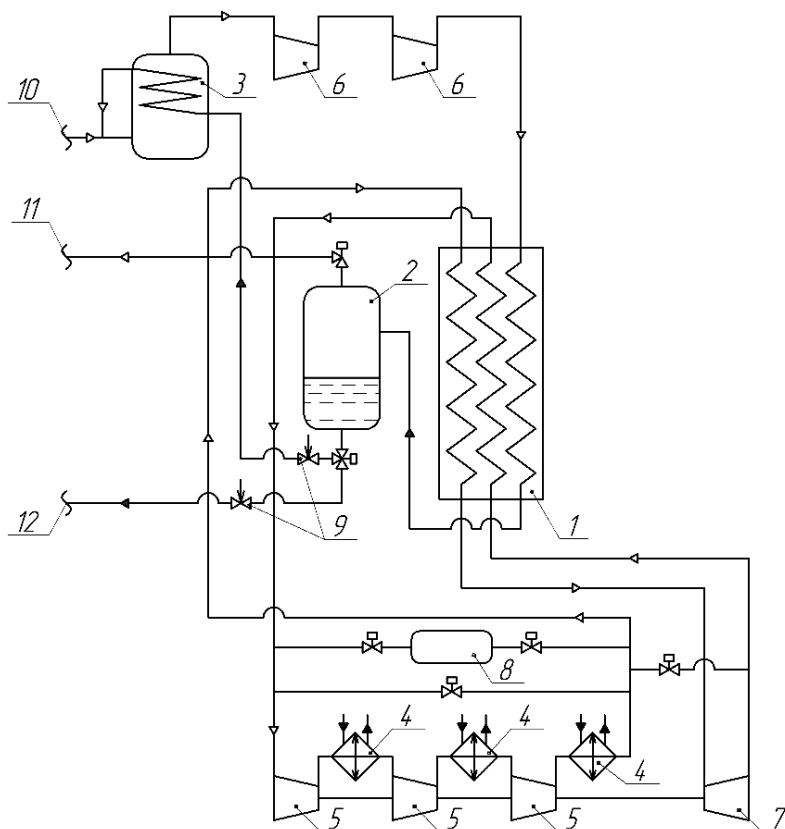


Рис. 1. Схема УПСГ

В контуре ПГ испарившийся газ, поступающий из грузовых танков (10), предварительно охлаждается в теплообменнике (3). Охлаждённый пар сжимается двухступенчатым компрессором (6), затем охлаждается и конденсируется в айс боксе (1). Полученный конденсат сепарируется (2) и дросселируется на вентиле (9). Часть сдросселированного СПГ направляется в теплообменник 3 на охлаждение вновь поступающих паров. Большая часть СПГ возвращается в грузовые танки (12). Неконденсируемые газы распределяются по танкам, либо направляются на дожигание (11).

Азотный контур замкнут. Азот сжимается компрессорами (5) с промежуточным охлаждением в теплообменниках (4). Дальнейшее охлаждение азота происходит в айс боксе. Охлаждённый азот дросселируется в турбодетандере (7), приводящем, параллельно с электродвигателем (на схеме не показан), азотный компрессор. Сдросселированный азот возвращается в айс бокс для охлаждения “горячего” компримированного азота и конденсации паров ПГ.

В соответствии с [1, с. 11], номинальная мощность УПСГ, работающей по циклу Брайтона, определяется по формуле 1.

$$N_{\text{УПСГ}} = \text{BOR} \cdot W \cdot \frac{\rho_{\text{М}} \cdot \gamma_{\text{М}}}{24 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{УПСГ}}}, \quad (1)$$

где BOR – суточная доля испарений груза; W – геометрический объём грузовых танков; $\eta_{\text{УПСГ}}$ – КПД УПСГ; $\rho_{\text{М}}$, $\gamma_{\text{М}}$ – плотность и удельная теплота парообразования метана (главного компонента СПГ).

Установка имеет КПД порядка 17%. Этому значению соответствует диапазон номинальных мощностей УПСГ супер-СПГ-танкеров: 5-7 МВт. Под номинальной понимается мощность, необходимая для сжижения всего объёма груза, испаряющегося в танках.

Существуют и другие схемы УПСГ, например, каскадные. В них применяется одновременно несколько хладагентов (например, этилен и пропилен). Такие установки более экономичны, но сложнее конструктивно и представляют серьёзную опасность для окружающей среды.

Применение УПСГ в составе СЭУ с ЕЭЭС

Единая электроэнергетическая система подразумевает полное обеспечение судовой потребности в электроэнергии главными двухтопливными электрогенераторными агрегатами. Тогда, УПСГ сжижает ПГ, не востребованный приводными двигателями генераторов. Для определения её мощности была выведена формула 2.

$$N_{\text{УПСГ}} = \frac{\frac{\text{BOR} \cdot W \cdot \rho_{\text{М}}}{24} \cdot g_{\text{е}}^{\text{ПГ}} \cdot (N_{\text{СЭС}}^{\text{ВЭУ+ОСП}} + N_{\text{ПУ}})}{\frac{3600 \cdot \eta_{\text{УПСГ}}}{\gamma_{\text{М}}} + g_{\text{е}}^{\text{ПГ}}}, \quad (2)$$

где $g_e^{ПГ}$ – удельный расход ПГ приводов главных электрогенераторов – в расчётах принят на уровне Wärtsilä 50DF [5, с.22]; $N_{СЭС}^{ВЭУ+ОСП}$ – мощность СЭС, потребляемая вспомогательной энергетической установкой (ВЭУ) и общесудовым потребителям (ОСП) (за исключением УПСГ); $N_{ПУ}$ – мощность ПУ на режиме.

Формулой реализуется главный принцип ЕЭЭС – генерирование электроэнергии для всех потребителей единой СЭС. В данном случае добавочная мощность главных электрогенераторов, необходимая для работы УПСГ ($N_{УПСГ}$), будет в первую очередь определяться мощностью, которую те же генераторы обеспечивают пропульсивной установке ($N_{ПУ}$).

Один из наиболее чувствительных к применению УПСГ комплексных показателей эффективности СЭУ – это конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ), измеряемый в граммах CO_2 на одну тонну дедвейта судна, выделяемых СЭУ при прохождении судном одной морской мили. Для ЕЭЭС ККЭЭ определяется по формуле 3 [1].

$$ККЭЭ = \frac{10^{-3} \cdot C_{ГД} \cdot g_e^{ГД} (0,83 \cdot f_j \cdot \sum N_{ГД}^{ПУ \text{ ном}} + N_{СЭС})}{f_i \cdot v_1 \cdot DWT}, \quad (3)$$

где f_j и f_i – поправки на класс ледовых усилений судна (приняты на класс Ice 3); $\sum N_{ГД}^{ПУ \text{ ном}}$ – максимальное значение мощности, потребной ПУ; $N_{СЭС}$ – мощность СЭС, необходимая для работы всех элементов ЕЭЭС, кроме ПУ; $g_e^{ГД}$ – удельный расход топливной смеси главных двигателей (ГД); $C_{ГД}$ – граммы углекислого газа, приходящиеся на один грамм окисляемой топливной смеси ГД; v_1 – скорость судна с грузом; DWT – дедвейт судна.

Особенности формулы ККЭЭ для ЕЭЭС:

1. одинаковый удельный расход топлива на ПУ и на генерацию электроэнергии для ВЭУ и ОСП;
2. семнадцатипроцентный запас по пропульсивной мощности относительно расчётного режима.

На рис. 2 приведён график изменения ККЭЭ СПГ-танкера с ЕЭЭС в зависимости от грузоподъемности. Использование ЕЭЭС предполагается на газовозах класса не выше чем «Большой стандартный», что подтверждается фиксируемыми в судостроении тенденциями.

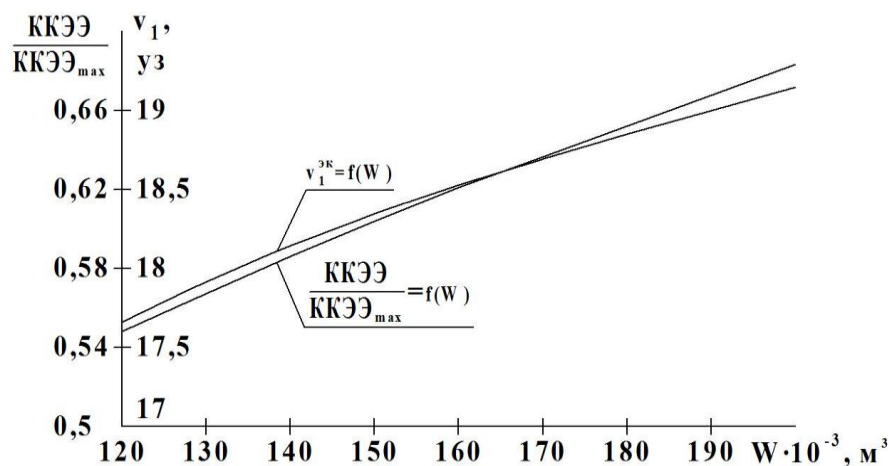


Рис. 2. ККЭЭ СПГ-танкеров с ЕЭЭС при переменной скорости хода

ККЭЭ на графике дан в относительных единицах – относительно значения на базовой линии для соответствующего дедвейта [2, с. 22]. Построен график для режима работы ЕЭЭС, на котором поддержание некоторой скорости хода $v_1^{ЭК}$, а также обеспечение электроэнергией остальных потребителей, требует всего объёма испаряющегося СПГ, т.е. УПСГ не применяется.

Из рис. 2 следует, что с позиции соблюдения требований по предельным значениям ККЭЭ рассматриваемая схема утилизации ПГ применима на всём расчётном диапазоне, к тому же максимальное значение расчётной $v_1^{ЭК}$ не превышает 19,2 уз.

КПД СЭУ не показал значительной чувствительности к применению УПСГ – для всех точек графиков на рис. 2 он составляет порядка 44%.

Применение УПСГ в составе СЭУ с МОД

Большая экономичность главных МОД в сравнении с двигателями 50DF создаёт значительно большую избыточность испаряющегося груза. В расчётах в качестве главных МОД были рассмотрены двигатели MAN B&W G70ME-GI [3]. Вспомогательная электростанция такой СЭУ – автономна. Её генераторы приводятся средне- и высокооборотными двигателями. Расчёты были проведены для приводных двухтопливных среднеоборотных двигателей Wärtsilä 34DF [4]. СЭС укомплектована именно двухтопливными электрогенераторными агрегатами, т.к. это позволяет дополнительно снизить нагрузку на УПСГ, т.е. понизить ККЭЭ.

Экономичность вспомогательных двигателей 34DF ниже, чем двигателей 50DF в составе ЕЭЭС, но, поскольку ими вырабатывается электроэнергия, потребная лишь для ВЭУ и ОСП, в целом энергетическая эффективность СЭУ с МОД будет выше. КПД таких СЭУ составляет порядка 48,5%. Для расчёта мощности УПСГ в составе СЭУ с МОД была выведена формула 4.

$$N_{\text{УПСГ}} = \frac{\frac{B_{\text{ОР}} \cdot W_{\text{РМ}}}{24} \cdot (g_e^{\text{ПГ ВД}} \cdot N_{\text{СЭС}}^{\text{ВЭУ+ОСП}} + g_e^{\text{ПГ ГД}} \cdot N_{\text{ПУ}})}{\frac{3600 \cdot \eta_{\text{УПСГ}}}{\Gamma_{\text{М}}} + g_e^{\text{ПГ ВД}}}, \quad (4)$$

где $g_e^{\text{ПГ ГД}}$ и $g_e^{\text{ПГ ВД}}$ – соответственно удельный расход ПГ главных МОД и приводных двигателей вспомогательной СЭС.

Принципиальное отличие формулы 4 от формулы 2 заключается в зависимости мощности УПСГ в формуле 4 от режимов работы двух различных типов двигателей. Из сравнения этих двух формул видно, что, при использовании одинаковых систем удержания груза, мощность УПСГ в составе СЭУ с МОД должна быть выше, чем в составе СЭУ СПГ-танкера с ЕЭЭС. ККЭЭ этого типа СЭУ определяется по формуле 5 [1].

$$\text{ККЭЭ} = \frac{10^{-3} (0,75 \cdot f_j \cdot \sum N_{\text{ГД}}^{\text{СМДМ}} \cdot C_{\text{ГД}} \cdot g_e^{\text{ГД}} + N_{\text{СЭС}} \cdot C_{\text{ВД}} \cdot g_e^{\text{ВД}})}{f_1 \cdot v_1 \cdot \text{DWT}}, \quad (5)$$

где $\sum N_{\text{ГД}}^{\text{СМДМ}}$ – суммарная спецификационная максимальная длительная мощность МОД; $N_{\text{СЭС}}$ – мощность вспомогательной СЭС; $g_e^{\text{ВД}}$ – удельный расход топливной смеси ВД; $C_{\text{ВД}}$ – граммы углекислого газа, приходящиеся на один грамм окисляемой топливной смеси ВД.

Особенности формулы ККЭЭ для СЭУ с МОД:

1. учёт различной экономичности ГД и ВД;
2. учёт различной производительности ГД и ВД по CO_2 ;
3. двадцати пяти процентный запас по пропульсивной мощности относительно расчётного режима.

На рис. 3 показано изменение ККЭЭ СПГ-танкеров с МОД классов Q-flex и Q-max (супер-СПГ-танкеров) в зависимости от грузовместимости.

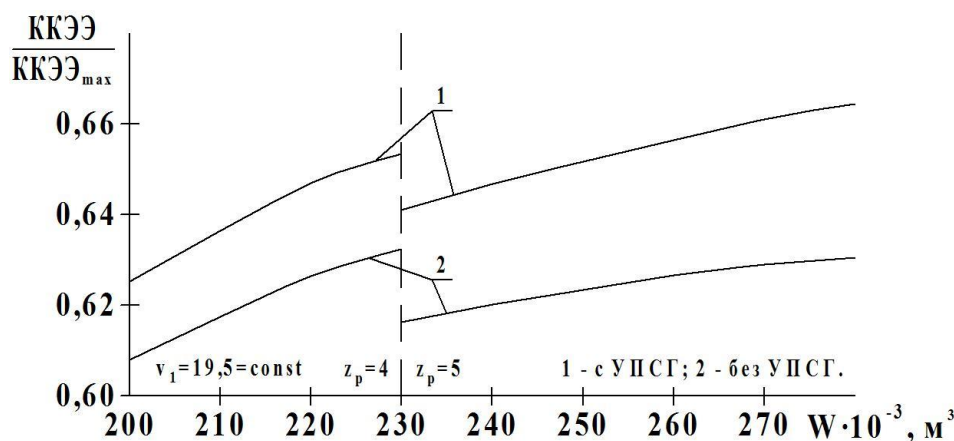


Рис. 3. ККЭЭ СПГ-танкеров с МОД при скорости хода в 19,5 уз

Графики построены для постоянной скорости хода в 19,5 уз, являющейся стандартной для рассматриваемых классов СПГ-танкеров. При грузовой вместимости менее 230 тыс. м³ в расчётах использовалась серия 4-х лопастных винтов с дисковым отношением 0,7; при большей грузовой вместимости данные приведены для пропульсивной установки с пяти лопастными винтами с дисковым отношением 0,65.

Из сравнения с рис. 2 видно, что повышенная энергетическая эффективность СЭУ с МОД, даже при повышении скорости хода на 1 уз, обуславливает значительную избыточность выпара груза, повторное сжижение которого приводит к возрастанию ККЭЭ на 5% и более. С другой стороны, дожигание всё возрастающего с увеличением грузовой вместимости объёма испарений груза не рационально. На рис. 4 приведены графики для другого варианта утилизации испаряющегося СПГ – для хода с повышенной скоростью (скорости подписаны на дополнительной горизонтальной оси).

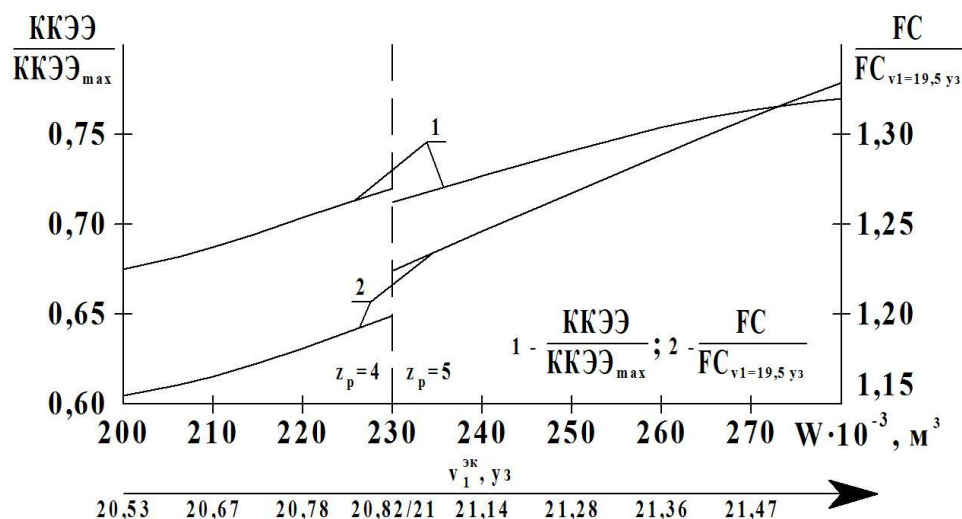


Рис. 4. ККЭЭ СПГ-танкеров с МОД при переменной скорости хода

Для качественной оценки этого варианта также приводится график отношения среднечасовых затрат по топливу при ходе со скоростью $v_1^{ЭК}$ к затратам предыдущего варианта. Из рисунка видно, что этот вариант сопряжён со значительным ухудшением ККЭЭ (до +12%) и к тому же экономически нецелесообразен – затраты по топливу возрастают на 15-30%. Т.е. наилучшей из альтернатив остаётся применение УПСГ. При этом, необходимое снижение ККЭЭ может быть обеспечено, например, использованием систем глубокой утилизации теплоты, а также повышением качества систем удержания груза и повышением эффективности самих УПСГ.

Заключение

1. Использование предложенных на рынке УПСГ сопряжено со значительной потерей энергетической эффективности проектом.
2. На СПГ-танкерах с ЕЭЭС возможен отказ от применения УПСГ при ходе судна с эксплуатационной скоростью, на которой весь объём испаряющегося СПГ потребляется СЭУ и при дожигании незначительного избытка испарений груза.
3. Увеличение скорости хода супер-СПГ-танкеров до уровня, не требующего использования УПСГ, приводит к значительному росту затрат по топливу.
4. Включение УПСГ в состав СЭУ супер-СПГ-танкеров неизбежно при сохранении на прежнем уровне эффективности систем удержания груза.
5. Применение УПСГ в составе СЭУ с МОД не приводит к критическому ухудшению показателей энергетической эффективности, тем не менее грядущее ужесточение экологического законодательства требует их совершенствования.

Список литературы / References

1. MARPOL 73/78 Annex 5 Resolution MEPC.245 (66) Guidelines on the method of calculation of the attained EEDI for new ships, 2014. 30 с.
2. Survey and certification rules on energy efficiency of ships. Istanbul: Türk Loydu, 2015. 28 с.
3. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII Project Guide. Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2017. 456 с.
4. WÄRTSILÄ 34DF Product Guide. Helsinki: Wärtsilä, 2017. 232 с.
5. WÄRTSILÄ 50DF Product Guide. Vaasa: Wärtsilä, 2016. 240 с.
6. Gomez J. Romero, Gomez M. Romero, Garcia R. Ferreiro, Catoira A. De Miguel. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study // Polish maritime research. 2014. № 81. С. 77–88