

УДК: 629.122

DOI: 10.46960/2782-5477_2022_4_36

М.В. Шумовский¹, С.Н. Хрунков²
ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВИДА ТОПЛИВА ДЛЯ ГЛАВНОГО
ДВИГАТЕЛЯ РЕЧНОГО СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

¹*Центральное конструкторское бюро по судам на подводных крыльях
им. Р.Е. Алексеева*

²*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Рассмотрена возможность применения энергетической установки судна на подводных крыльях, работающей на газообразном топливе. Выполнен анализ экономической и экологической эффективности применения различных видов топлив. Рассмотрены преимущества, недостатки и способы хранения каждого вида газообразного топлива. Выявлены основные проблемы применения сжиженного природного газа.

Ключевые слова: судно на подводных крыльях, Валдай 45Р, природный газ, газообразное топливо, СПГ, КПГ, газотурбинный двигатель.

В настоящее время суда на подводных крыльях (СПК) имеют большие перспективы [1,2]. Одним из серийных СПК является проект 23180 «Валдай 45Р» (организация-строитель – АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород), предназначенный для перевозки пассажиров в светлое время суток в районах с умеренным климатом в бассейнах разряда «Р» [3,4]. Общий вид судна представлен на рис. 1.



Рис. 1. Судно на подводных крыльях проекта 23180 «Валдай 45Р»

Основные характеристики судна:

Длина габаритная, м.....	21,3
Ширина габаритная, м.....	5,2
Осадка габаритная на плаву, м.....	1,1
Водоизмещение полное, т.....	21,4
Пассажировместимость, чел.....	45
Экипаж, чел.....	2
Скорость хода, км/ч.....	65
Дальность хода, км.....	400
Автономность плавания, ч.....	8

СПК «Валдай 45Р» выпускается с поршневым дизельным главным двигателем MAN D2842LE 410 (Германия), а с 2020 г. с главным двигателем FPT С 16 1000 (Италия). Перспективным решением экономической и экологической эффективности на сегодняшний день является установка главного двигателя, работающего на природном газовом топливе [5]. На текущий момент, согласно презентации фирмы MTU (Германия), удельная масса судового газопоршневого двигателя составляет 8,0 кг/кВт [6]. Данный показатель в 3,5 раза превышает показатели устанавливаемых в настоящий момент на СПК поршневых дизельных двигателей (табл. 1). Таким образом, масса энергетической установки возрастает более чем на 2000 кг, что составляет 6,5 % от водоизмещения судна и является критическим для СПК.

Альтернативным вариантом для СПК «Валдай 45Р» является применение газотурбинного двигателя МСУ-800 производства ПАО «Калужский двигатель», работающего как на дизельном, так и на газообразном топливе [7].

Общий вид газотурбинного двигателя МСУ-800 представлен на рис. 2.



Рис. 2. Газотурбинный двигатель МСУ-800

Анализ табл. 1 показывает, что газотурбинный двигатель, работающий на газообразном топливе соответствует современным экологическим нормам [8]. Согласно методики расчета запасов топлива [9,10] определим стоимость одного рейса на дизельном и газообразном топливе. Продолжительность хода судна T , ч, на эксплуатационной скорости определяется по формуле

$$T=A/V, \quad (1)$$

где A – дальность хода судна;

V – эксплуатационная скорость.

$$T = 400/65 = 6,15 \text{ ч}$$

Расход топлива главным двигателем G_T , кг (л) определяется по формуле

$$G_T = K_1 \cdot K_2 \cdot q_T \cdot N_d \cdot T, \quad (2)$$

где $K_1 = 1,05$ коэффициент эксплуатационного запаса;

$K_2 = 1,1$ коэффициент учитывающий ввод установки в действие;

q_T – удельный расход топлива, г/кВт·ч;

$N_d = 570$ кВт эксплуатационная мощность главного двигателя.

Стоимость на 2022 г: дизельного топлива 53 руб/л; природного газа 28 руб/л.

Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 1.
Технические характеристики главных двигателей для СПК «Валдай 45Р»

Параметр	Поршневой дизельный двигатель		Газотурбинный двигатель
	MAN D2842LE 410	FPT C 16 1000 (C16 ENTMP 100)	МСУ-800
Номинальная мощность, кВт	809	735	860
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	2100	2300	7500
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	209	228	325
Удельный расход природного газа, г/кВт·ч	-	-	275
Ресурс до капитального ремонта, ч	25000	22500	25000
Полный ресурс, ч	60000	45000	75000
Масса, кг	1860	1690	950
Удельная масса, кг/кВт	2,3	2,3	1,1
Экологическая норма по MARPOL 73/78 Приложение VI	Tier I	Tier II	Tier III (газ)
Выбросы CO, г/кВт·ч	0,82	0,5	0,07
Выбросы NOx, г/кВт·ч	7,66	2,5	0,008
Твердые частицы	0,001	0,001	незначительно

Таблица 2.
Результаты стоимости одного рейса

Параметр	Поршневой дизельный двигатель		Газотурбинный двигатель
	MAN D2842LE 410	FPT C 16 1000 (C16 ENTMP 100)	МСУ-800
Расход дизельного топлива G_T , кг	846	923	1315
Расход природного газа G_T , кг	-	-	1113
Стоимость одного рейса при работе на дизельном топливе, руб.	44838	48919	69695
Стоимость одного рейса при работе на природном газе, руб.	-	-	31164

Несмотря на большой расход природного газа газотурбинным двигателем по сравнению с дизельными двигателями, выгода стоимости одного рейса составляет порядка 36 %.

В качестве газообразного топлива в энергетических установках используется [11]:

- компримированный природный газ (КПГ) – сжатый природный газ с объемным содержанием метана CH_4 более 85 % (до 98 %);
- сжиженный природный газ (СПГ) – сжиженный природный газ с объемным содержанием метана от 85 % до 95 %, температурой кипения от -158 °С до -163 °С при давлении 0,10133 МПа, который получают путем сжатия природного газа с последующим его охлаждением для перевода в жидкую фазу; после сжижения газ сжимается в объеме примерно в 600 раз;

- сжиженный нефтяной (углеводородный) газ (СНГ) – синтетический газ, который получают путем сжижения попутного нефтяного газа или газа, образующегося при переработке нефти, состоящий из смеси пропана C_3H_8 с его содержанием по объему от 40 % до близкому к 100 %, бутана C_4H_{10} и других попутных газов в оставшейся части объема смеси этих газов.

По данным [12], СНГ потребуется на 25-30 % больше, чем КПП и СПГ, так как теплота сгорания такого газа несколько ниже. В качестве емкостей СНГ допускается применение только баллоны стандартного исполнения емкостью не более 50 л и рабочим давлением не более 1,6 МПа [13]. Баллоны должны быть объединены в группы. В каждой группе допускается использование не более четырех баллонов. Масса газа (пропана) в одном баллоне емкостью 50 л составляет 21,2 кг при массе порожнего баллона 22,0 кг [14]. В качестве емкостей КПП могут применяться болоны и специально изготовленные для газотопливного судна емкости с рабочим давлением до 25 МПа.

Согласно [15] баллоны КПП подразделяются на:

- КПП-1 – баллон металлический;
- КПП-2 – баллон с металлическим лейнером, армированным внешней намоткой армирующим материалом, пропитанным связующим (намотка в виде обрuchей);
- КПП-3 – баллон с металлическим лейнером, армированным жгутовой нитью, пропитанной связующим (сплошная намотка);
- КПП-4 – баллон с лейнером из неметаллического материала, армированным жгутовой нитью, пропитанной связующим (полностью из композиционных материалов).

Масса баллонов КПП представлена в табл. 3.

Таблица 3.
Масса баллонов КПП

Тип баллона	Средняя масса баллона относительно 1л объема, кг
КПП-1	0,8
КПП-2	0,68
КПП-3	0,41
КПП-4	0,33

В случае применения однотопливного главного двигателя, работающего на природном газе, судно должно быть оборудовано двумя емкостями СПГ сопоставимого объема. По данным фирм-поставщиков, емкости СПГ имеют удельную массу порожней емкости от 1,4 до 2 относительно одного кг СПГ. Расчет топливных емкостей, обеспечивающих заданную автономность, представлен в табл. 4. В связи с жесткими ограничениями СПК по массогабаритным характеристикам согласно табл. 4 предпочтение отдается емкостям СПГ. К тому же баллоны для хранения СНГ в соответствии ч. XI ПКПС [12] должны заправляться на берегу и поставляться на судно в заправленном виде. Требование распространяется и на емкости КПП, если в их качестве используются баллоны.

Увеличение массы энергетической установки за счет выбора легкого газотурбинного двигателя составляет порядка 200 кг, что является допустимым. Следует отметить, что под воздействием тепловых излучений происходит процесс испарения СПГ. Согласно [10] испарение в современных баллонах СПГ составляет до 3 % в сутки, что составляет 33 кг от общего запаса. Максимальный дополнительный расход на топливо составляет примерно 1000 руб. в сутки при условии, что судно находится в простое. Опыт эксплуатации СПК показывает, что бункеровка, преимущественно, выполняется перед рейсом, поэтому дополнительный расход топлива от испарения более корректно считать от остатка топлива в баках после выполнения рейса. Таким образом, потери на испарение СПГ можно считать незначительными.

Таблица 4.
Расчет топливных емкостей, обеспечивающих заданную автономность

Топливо	Нормативный документ на топливо	Нормативный документ на емкости	Количество баллонов/ емкостей, шт.	Масса баллонов/ емкостей, кг	Объем, занимаемый баллонами/ емкостями, м ³
СНГ	ГОСТ Р 52087-2018 Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия	ГОСТ 15860-84 Баллоны стальные сварные для сжиженных углеводородных газов на давление до 1,6 МПа. технические условия	53	11660	≈ 13
КПГ	ГОСТ 27577-2000 Газ природный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия	ГОСТ 33986-2016 Автомобильные транспортные средства. Баллоны высокого давления для компримированного природного газа, используемого в качестве моторного топлива. Технические требования и методы испытания	2-4	≈ 2080	≈ 6,3
СПГ	ГОСТ Р 57431-2017 Газ природный сжиженный. Общие технические требования	Ссоответствует РРР	2	≈ 1500	≈ 3,3
Дизельное топливо	ГОСТ 305-2013 Топливо дизельное. Технические условия.	-	2	7700	1,1

Существенной проблемой применение СПГ на СПК является размещение емкостей. В целях безопасности пассажиров емкость СПГ, согласно ч. XI ПКПС [12], можно разместить на открытой палубе в кормовой части судна над машинным отделением. При размещении емкости СПГ на открытой палубе следует уделить внимание расчету устойчивости и непотопляемости судна. С учетом роста мирового спроса на СПГ и активного наращивания производственных мощностей индустрии СПГ и бункеровки СПГ в России, следует отметить существующие перспективы для создания нового проекта СПК, работающего на СПГ.

Таким образом, обоснована экономическая и экологическая целесообразность перехода с дизельного топлива на сжиженный природный газ при условии замены поршневого главного двигателя газотурбинным. При этом переоборудование транспортного средства не влечет критических для судна на подводных крыльях изменений в конструкции.

Библиографический список

1. Кудряшова, Т.В. Перспективы судов на подводных крыльях на речных пассажирских перевозках [Текст] // Проблемы внедрения результатов инновационных разработок и пути их решения. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Саратов, 14 сентября 2019 г. – Уфа: ООО «Агентство международных исследований», 2019. С. 71-73.

2. Барышников, С.О. Анализ и перспективы строительства пассажирских судов на подводных крыльях [Текст] С.О. Барышников, М.В. Сухотерин // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. С. 201-209.
3. «Комета 120М» и «Валдай 45Р» – первые ласточки отечественного круизного судостроения [Текст] // Управление качеством. 2017. № 12. С. 9-11.
4. Заварзин, В.Г. Перспективы развития скоростных пассажирских перевозок в Нижегородской области [Текст] / В.Г. Заварзин, Е.С. Бажутова // Великие реки' 2020. Труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного форума 2020 г. – Н. Новгород: НГАСУ, 2020. С. 115.
5. Гаврик, Т.Ю. Преимущества природного газа как моторного топлива на транспорте [Текст] // Академия педагогических идей «Новация». 2020. № 6. С. 49-53.
6. MTU Engine S4000M05-N Gas Mobile Marine / Friedrichshafen I September 2021/ [Электронный ресурс] URL: <https://expotrade.ru/kongress/interdive-friedrichshafen-2021-2021>(дата обращения 15 сентября 2022).
7. Калужские двигателисты готовы выйти на рынок энергетических микротурбин [Текст] // Газотурбинные технологии. 2020. № 2 (169). С. 10-13.
8. Приложение VI к конвенции МАРПОЛ 73/78 – Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496> (дата обращения 15 сентября 2022).
9. Мухина, М.Л. Ходовые характеристики и проблема уменьшения расходов топлива у судов на подводных крыльях [Текст] // Транспортные системы. 2018. № 4 (10). С. 37-42.
10. РД5.4243-78 Запасы топлива и масла. Методика расчета. Утвержден 03.01.1978. [Текст]. – 38 с.
11. Булгаков, С.В. Использование природного газа на транспорте [Текст] // Прогрессивные технологии и процессы. 2017. С. 38-42.
12. Ерохов, В.И. Экологические параметры газобаллонного автомобиля, работающего на сжиженном природном газе [Текст] // Грузовик. 2017. № 8. С. 35-43.
13. Российское Классификационное Общество, 2019 г. [Электронный ресурс] URL: <https://rfclass.ru> (дата обращения 15 сентября 2022).
14. ГОСТ 15860-84. Баллоны стальные сварные для сжиженных углеводородных газов на давление до 1,6 МПа. Технические условия.
15. ГОСТ 33986-2016 Межгосударственный стандарт. Автомобильные транспортные средства. Баллоны высокого давления для компримированного природного газа, используемого в качестве моторного топлива. Технические требования и методы испытаний.