

УДК 621.432

EDN PMABEW

**Д.Н. Варсеев, Е.Д. Федосова**  
**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**  
**АЛЬТЕРНАТИВНОГО ВИДА ТОПЛИВА НА СУХОГРУЗНОМ СУДНЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена возможность использования в качестве топлива на транспортных судах биодизеля вместо дизельного топлива. Объект исследования – универсальное сухогрузное судно г/п 2500 т. Приведен анализ различных видов альтернативного топлива, аналогичных дизельному топливу. Приведен уточненный расчет топливной системы СЭУ. Полученные результаты могут быть использованы в аналогичных исследованиях и проектировании СЭУ.

**Ключевые слова:** дизельное топливо, биодизель, сухогрузное судно, судовая энергетическая установка

### Введение

Примерно 90 % используемой человеком механической энергии вырабатывается двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Они являются основными потребителями топлив нефтяного происхождения, геологические ресурсы которых весьма ограничены и, какими бы огромными не казались, все же исчерпаемы. Кроме того, ситуация в мировой экологии требует к себе весьма пристального внимания. Постепенное внедрение альтернативных топлив позволит снизить зависимость человечества от нефтяных топлив и решить экологические проблемы, связанные с их использованием в судовых энергетических установках (СЭУ). По приросту потребления энергии транспорт занимает второе место после промышленности. Потребление энергии в этом секторе выросло за последние годы более чем на 50 %, где около 64 % расходуемых моторных топлив приходится на автомобильный транспорт, примерно 12 % потребляет сельское хозяйство. Водный транспорт России использует около 2 % моторного топлива, при этом по сравнению с другими видами транспортных средств по уровню выбросов оксидов серы и двуокиси углерода водный транспорт считается самым «грязным» – на его долю приходится до 5,3 % общих выбросов в окружающую среду.

В мировом масштабе принимается ряд коренных мер, направленных на снижение загрязнений окружающей среды, повышение экономии топлива, улучшение характеристик энергетических установок в секции водного транспорта. В последнее время весьма широкое распространение получают альтернативные возобновляемые виды энергоносителей. Так, начиная с 2023 г., суда должны будут ежегодно уменьшать свою углеродную интенсивность, а именно объемы выбросов парниковых газов в атмосферу на единицу транспортной работы, в соответствии с установленными понижающими значениями. Морские администрации будут присваивать судам ежегодный рейтинг углеродной интенсивности А, В, С, D или E – в зависимости от достигнутых показателей. При получении низких рейтингов судну необходимо будет разработать и выполнить план корректирующих действий по улучшению углеродной интенсивности.

Важным фактором для нашей страны будет планируемое Евросоюзом введение углеродного налогообложения импортной продукции из тех стран, где превышены выбросы парниковых газов, начиная с 2023 г. По этой причине потери российского экспорта в 2025-2030 гг. могут достичь 33 млрд долл., поскольку на ЕС приходится более 40 % экспорта углеводородов. В ближайшие десятилетия для России будут актуальными риски адаптации к

глобальной «зеленой» экономике, связанные с развитием экологически чистых и возобновляемых источников энергии, декарбонизацией и уменьшением потребления углеводородного топлива.

### Аналитический обзор видов топлива на водном транспорте

Самым распространенным типом топлива на водном транспорте является дизельное топливо (ДТ). Оно получающееся из керосиново-газойлевых фракций прямой перегонки нефти и относится к ископаемым видам топлив. Дизельное топливо по многим показателям считается более безопасным чем бензин из-за температуры вспышки, при этом дизельные двигатели могут выдержать очень высокую нагрузку и давление, которые ограничиваются только прочностью компонентов. Кроме того ДВС, работающие на дизельном топливе, не имеют системы зажигания от искры высокого напряжения, что обеспечивает высокую надежность и легкую адаптацию к окружающей среде с высокой влажностью, что крайне важно в судовых условиях.

Среди альтернативных видов топлива в настоящее время рассматриваются: сжиженный природный газ (СПГ), сжиженный углеводородный газ (СУГ), метанол, этанол, рапсовое масло, метиловый эфир рапсового масла, биодизельное топливо (биодизель, БД) и водород. Объектом исследования было выбрано проектируемое универсальное сухогрузное судно г/п 2500 т с главной энергетической установкой (ГЭУ) – дизельный ДВС Weichai CW16V200ZC-8. Кроме ГЭУ, основными потребителями дизельного топлива являются электроэнергетическая установка (2хДГ-75М2-3) и теплоэнергетическая установка (КСО-50 R).

Целью исследования была проработка возможности применения на судне альтернативного вида топлива вместо классического дизельного.

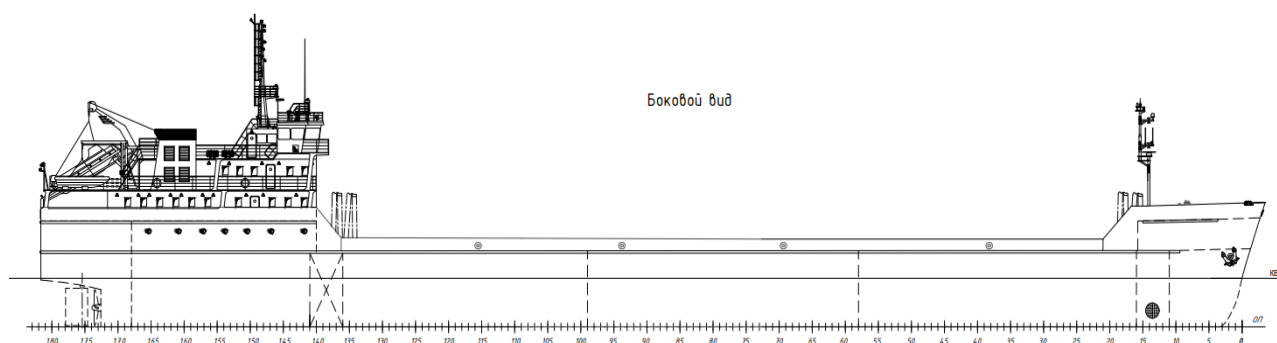


Рис. 1. Универсальное сухогрузное судно г/п 2500 т

Таблица 1.  
Сравнительный анализ топлив

	Рапсовое масло	Метиловый эфир рапсового масла	Биодизель	Этанол	Дизельное топливо
Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	917,4	870	860	789,0	860
Вязкость, мм <sup>2</sup> /с	75	8,33	7,1	1	4,0
Температура вспышки в закрытом тигеле, К	368	329	393	286	313
Ценовое число	40	48	51	8	45
Низшей теплоте сгорания, кДж/кг	37	37	32,6	30,6	42,5
Стоимость, руб.	85	120	60	55-65	64,49

В рамках исследования была рассмотрена возможность применения на судне вместо дизельного топлива альтернативных вариантов: биодизеля, этанола, рапсового масла, метилового эфира рапсового масла. Подбор аналога для проектируемого судна ведем с последующим сравнением по приведенным характеристикам: плотности, вязкости температуре вспышки, цетановому числу, низшей теплоте сгорания и стоимости. Сравнительный анализ приведен в табл. 1.

При рассмотрении данных делаем вывод, что максимально близкими аналогами дизельного топлива являются рапсовое масло и биодизель. В дальнейшем сравним данные два варианта по близости к эталону по удельному расходу топлива (табл. 2).

**Таблица 2.**  
**Сравнение близости основных аналогов к ДТ по удельному расходу топлива**

	Рапсовое масло	Биодизель	Дизельное топливо
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	232,8	215,6	192,5

Самым оптимальным из рассмотренных вариантов является биодизель. В дальнейшем проведем перерасчет основных потребителей на судне под эксплуатацию на биодизельном топливе.

### Перерасчет топливной системы для использования в СЭУ биодизельного топлива

Система предназначена для приема, хранения, перекачки, подогрева, очистки и подачи распыленного топлива в цилиндры дизеля.

Топливная система включает:

- 1) *системы низкого давления* (для подготовки и подачи топлива к системе высокого давления), включают насосы, фильтры, сепаратор, подогреватели, цистерны и топливопроводы;
- 2) *системы высокого давления* (для впрыскивания топлива в камеру сгорания), включают топливный насос высокого давления (ТНВД) и форсунку, соединенные между собой топливопроводом высокого давления.

Подача насосов системы в общем случае определяется по выражению:

$$Q_v = \frac{24b_e N_e}{\tau_2 \rho_T}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1)$$

где  $b_e = 0,22 \text{ кг/кВт} \times \text{ч}$  – удельный расход топлива ГД;

$N_e = 1440 \text{ кВт}$  – мощность ГД;

$\rho_T = 860 \text{ кг/м}^3$  – плотность топлива;

$\tau_2 = 2 \text{ ч}$  – время перекачки топлива при давлении 0,3 МПа.

$$Q_v = \frac{24 \times 0,22 \times 1440}{2 \times 860} = 4,42 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для подачи топлива из цистерны основного запаса в расходную установлен дежурный насос, подачу которого выбираем из условия заполнения расходной цистерны за 25 минут:

$$Q_{\text{тд}} = \frac{V_p}{1500}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (2)$$

где  $V_p$  – объем расходной (заполняемой) цистерны из условия хранения 8-ми часового расхода топлива.

$$V_p = \frac{8k_M k b_e N_e}{\rho_T}, \text{ м}^3 \quad (3)$$

где  $k_M = 1,1$  – коэффициент «мертвого» запаса;  
 $k = 1$  – количество ГД.

$$V_p = \frac{8 \times 1,1 \times 1 \times 0,22 \times 1440}{860} = 3,24 \text{ м}^3.$$

$$Q_{\text{ГД}} = \frac{3,24}{1500} = 0,0022 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Устанавливаем отдельные расходные цистерны для ГД, вспомогательные двигатели и автономный котел.

Производительность сепаратора из условия очистки суточного расхода топлива за 10 часов:

$$Q_{\text{ТС}} = \frac{24(V_p + V_p^{\text{всп}} + V_p^{\text{к}})}{10\rho_T} \quad (4)$$

где:  $V_p^{\text{всп}}$  – объем расходных цистерн для вспомогательных двигателей,  $\text{м}^3$ ;

$V_p^{\text{к}}$  – объем расходных цистерн для автономных котлов,  $\text{м}^3$ ;

Объем расходной цистерны для вспомогательных двигателей из условия обеспечения их работы в течение 4 часов определяется по формуле:

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{4k'_M k' b'_e N'_e}{\rho_T} \quad (5)$$

где  $k'_M = 2$  – количество дизель-генераторов;

$b'_e = 0,299$  (0,267)  $\text{кг/кВт} \times \text{ч}$  – удельный расход топлива ДГ;

$N'_e = 84,5$   $\text{кВт}$  – мощность ДГ;

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{4 \times 1,1 \times 2 \times 0,299 \times 84,5}{860} = 0,259 \text{ м}^3.$$

Объем расходной цистерны для автономного котла из условия обеспечения работы в течение 4 часов определяется по формуле:

$$V_p^{\text{к}} = \frac{4k''_M k'' B_K}{\rho_T} \quad (6)$$

где  $k''_M = 1$  – количество автономных котлов;

$B_K = 6,5$  (5,8)  $\text{кг/ч}$  – часовой расход топлива автономного котла.

$$V_p^{\text{к}} = \frac{4 \times 1,1 \times 1 \times 6,5}{860} = 0,0333 \text{ м}^3.$$

$$Q_{\text{ТС}} = \frac{24 \times (3,24 + 0,259 + 0,0333)}{10 \times 860} = 0,00986 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Рассчитаем потребный объем основного запаса топлива для ГД.

$$V_{\text{осн}} = \frac{k_M k b_e N_e A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T}, \text{ м}^3 \quad (7)$$

где  $k_M = 1,2$  – коэффициент «мертвого» запаса;  
 $A=15$  суток – автономность судна;  
 $k = 1$  – количество ГД.

$$V_p = \frac{1,1 \times 1 \times 0,22 \times 1440 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 3,24 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем потребный объем основного запаса топлива для ГД.

$$V_p = \frac{k_M k b_e N_e A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T}, \text{ м}^3 \quad (8)$$

где  $k_M = 1,2$  – коэффициент мертвого запаса;  
 $A=15$  суток – автономность судна;  
 $k = 1$  – количество ГД.

$$V_p = \frac{1,2 \times 1 \times 0,22 \times 1440 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 190,96 \text{ м}^3.$$

Потребный объем топлива для вспомогательных двигателей:

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{k_M k' b_e' N_e' A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T} \quad (9)$$

где  $k' = 2$  – количество дизель-генераторов;  
 $A=15$  суток – автономность судна;  
 $b_e' = 0,299$  кг/кВт × ч – удельный расход топлива ДГ;  
 $N_e' = 84,5$  кВт – мощность ДГ.

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{1,2 \times 2 \times 0,299 \times 84,5 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 30,46 \text{ м}^3.$$

Потребный объем топлива для автономного котла:

$$V_p^k = \frac{k_M k'' B_k \cdot A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T} \quad (10)$$

где  $k'' = 1$  – количество автономных котлов;  
 $B_k = 6,5$  кг/ч – часовой расход топлива автономного котла.

$$V_p^k = \frac{1,2 \times 1 \times 6,5 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 3,92 \text{ м}^3.$$

Для обеспечения необходимым запаса топлива данного судна требуется объем цистерны основного запаса:

$$V_{\text{осн}} = V_p + V_p^{\text{всп}} + V_p^k = 190,96 + 30,46 + 3,92 = 225,34 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем потребный объем основного запаса дизельного топлива для ГД.

$$V_p = \frac{k_M k b_e N_e A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T}, \text{ м}^3 \quad (11)$$

где  $k_M = 1,2$  – коэффициент «мертвого» запаса;  
 $A=15$  суток – автономность судна;

$k = 1$  – количество ГД.

$$V_p = \frac{1,2 \times 1 \times 0,2 \times 1440 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 173,6 \text{ м}^3.$$

Потребный объем дизельного топлива для вспомогательных двигателей:

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{k_m k' b_e' N_e' A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T} \quad (12)$$

где  $k' = 2$  – количество дизель-генераторов;

$A=15$  суток – автономность судна;

$b_e' = 0,299$  кг/кВт × ч – удельный расход топлива ДГ;

$N_e' = 84,5$  кВт – мощность ДГ;

$$V_p^{\text{всп}} = \frac{1,2 \times 2 \times 0,267 \times 84,5 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 27,2 \text{ м}^3.$$

Потребный объем дизельного топлива для автономного котла:

$$V_p^{\text{к}} = \frac{k_m k'' B_k \cdot A \cdot 24 \cdot 1,2}{\rho_T} \quad (13)$$

где  $k'' = 1$  – количество автономных котлов;

$B_k = 6,5$  кг/ч – часовой расход топлива автономного котла.

$$V_p^{\text{к}} = \frac{1,2 \times 1 \times 5,8 \times 15 \times 24 \times 1,2}{860} = 3,5 \text{ м}^3.$$

Для обеспечения необходимым запасом дизельного топлива данного судна требуется объем цистерны основного запаса:

$$V_{\text{осн}} = V_p + V_p^{\text{всп}} + V_p^{\text{к}} = 173,6 + 27,2 + 3,5 = 204,3 \text{ м}^3.$$

### Соотношение полученных данных с исходными по проекту

Сравним объемы расходных цистерн, цистерн для автономных котлов. Определим изменение объемов в процентном соотношении. Для наглядности приведем данные в табл. 3, где:

$V_p$  – объем расходной (заполняемой) цистерны из условия хранения 8-ми часового расхода топлива;

$V_p^{\text{всп}}$  – объем расходных цистерн для вспомогательных двигателей;

$V_p^{\text{к}}$  – объем расходных цистерн для автономных котлов.

Таблица 3.

Соотношение объемов топливных цистерн на ДТ и БД

	$V_p, \text{ м}^3$	$V_p^{\text{всп}}, \text{ м}^3$	$V_p^{\text{к}}, \text{ м}^3$
Исходные данные	2,95	0,231	0,0297
Полученные данные	3,24	0,259	0,0333
Изменение, %	9,8	12,1	12,1

Сравним объемы цистерн основного запаса топлива. Определим изменение объемов в процентном соотношении. Для наглядности приведем данные в табл. 4.

**Таблица 4.**  
**Сравнение объемов цистерн основного запаса топлива на ДТ и БД**

	Объем цистерн для топлива, м <sup>3</sup>
Исходные данные (ДТ)	204,3
Полученные данные (БД)	225,34
Изменение, %	10,3

На текущий момент перевалка судового биотоплива происходит на терминале «Газпром нефти» в порту г. Санкт-Петербурга (первая бункеровка прошла в 2023 г.) В дальнейшем данный опыт распространится и на другие порты РФ. В стоимостном отношении судовладелец будет нести незначительные потери при переходе на биодизель при покупке альтернативного энергоносителя, что дополнительно должно стимулировать к дальнейшему плавному переходу на «зеленые» аналоги.

Для дальнейшего анализа посчитаем необходимую массу биодизеля и сравним исходную массу дизельного топлива и полученную массу биодизеля.

Массу биодизеля определим по формуле:

$$m_{\text{БД}} = \rho_{\text{Т}} \times V_{\text{ц}}^{\text{БД}}, \quad (14)$$

где  $V_{\text{ц}}^{\text{БД}} = 225,34$  – объем цистерны основного запаса биодизеля;

$\rho_{\text{Т}} = 860 \text{ кг/м}^3$  – плотность биодизельного топлива.

$$m_{\text{БД}} = 860 \times 225,34 \times 10^{-3} = 193,8 \text{ т}$$

Массу дизельного топлива определим по формуле:

$$m_{\text{ДТ}} = \rho_{\text{Т}} \times V_{\text{ц}}^{\text{ДТ}}, \quad (15)$$

где  $V_{\text{ц}}^{\text{ДТ}} = 204,3$  – объем цистерны основного запаса биодизеля;

$\rho_{\text{Т}} = 860 \text{ кг/м}^3$  – плотность биодизельного топлива.

$$m_{\text{ДТ}} = 860 \times 204,3 \times 10^{-3} = 175,7 \text{ т}$$

Грузоподъемность исходного проекта составляла 4735 т, после перехода на биодизель грузоподъемность составит 4753,1 т. В процентном соотношении грузоподъемность изменится на 0,4 %, что незначительно повлияет на дедевит.

### Эксплуатационные рекомендации

Биодизельное топливо можно использовать в существующих ДВС транспортных судов в составе стандартной топливной системы без значительного изменения систем хранения и подготовки топлива, хотя оно обладает высокой гигроскопичностью и активно абсорбирует влагу. Позитивно будет влиять высокий показатель вязкости биодизеля, что будет приводить к уменьшению протечек топливной аппаратуры. Нужно учитывать, что применение альтернативного топлива будет незначительно снижать суммарную мощность СЭУ, так как теплота сгорания дизельного топлива несколько выше (табл. 2).

При работе двигателя на БД снижается видимая дымность, выбросы твердых частиц, что связано с присутствием кислорода в топливе, благодаря чему происходит более полное сгорание топлива и уменьшается количество несгоревших топливных частиц, при этом биодизель нейтрален относительно выбросов CO<sub>2</sub> и не токсичен для живых организмов.

При переходе на биодизельное топливо рекомендуется:

- предварительно удалять отложения в топливной системе и аппаратуре перед переходом на биодизельное топливо;
- использовать фильтры с фильтрующими материалами, стойкими к воздействию биодизеля;
- не использовать в топливных системах каучуковые и натуральные резиновые материалы (обязательная замена на аналоги, изготовленные из стойких к биотопливу материалов);
- контролировать качества моторного масла в связи с попаданием в него биотоплива и возможное смещение интервала технического обслуживания ДВС;
- контролировать содержание воды в биодизеле, а также состояние фильтров и сепаратора.

### Заключение

По исходному проекту для сухогруза предусматривается применение дизельного топлива, но исследование показало, что на данном судне возможно применять биодизель без значительных конструктивных изменений (при снижении автономности примерно на сутки), либо с минимальным увеличением объема топливных цистерн и сохранением прежней автономности. Если учесть стоимости биодизеля и обычного дизельного топлива, то переход для судовладельца будет максимально мягким. Основная сложность на текущий момент состоит в значительном экспорте биодизельного топлива в связи с отсутствием массового потребителя данного вида энергоносителя в РФ. Были предложены рекомендации к переходу на биодизель и требуемые изменения в СЭУ.

Исследование подтверждает возможность применения данного вида альтернативного топлива на транспортных судах, несмотря на ряд недостатков, с высокой эффективностью.

### Библиографический список

1. **Марков, В.А.** Спиртовые топлива для дизельных двигателей / В.А. Марков, П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.В. Бирюков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 11. С. 39-52.
2. **Таманджа, И.** Перспективы и обоснование использования биодизеля в судовых дизельных установках / И. Таманджа, Н.Н. Шуймасов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2010. № 1. С. 158-166.
3. **Матиевский, Д.Д.** Применение топлива на основе рапсового масла в дизелях / Д.Д. Матиевский, С.П. Кулманаков, С.В. Лебедев и др. // Ползуновский Вестник. 2006. № 4. С. 118-127.
4. **Шумовский, М.В.** Выбор и обоснование вида топлива главного двигателя речного судна на подводных крыльях / М.В. Шумовский, С.Н. Хрунков // Транспортные системы. 2022. № 4. С. 36-41.
5. **Кориши, А.** Влияние интенсивности подвода теплоты и циклового массового наполнения на термодинамические циклы дизельного двигателя / А. Кориши, С.Н. Хрунков // Транспортные системы. 2022. № 2. С. 33-41.
6. **Никоноров, А.Н.** Возможности применения рапсового масла и рапсового метилового эфира как альтернативы дизельному топливу / А.Н. Никоноров, Р.К. Хаджимуратов // Наука, техника и образование. 2018. № 5. С. 43-45.
7. **Втюрина, М.Н.** Исследование свойств этанола-топливных эмульсий с присадками / М.Н. Втюрина, А.В. Пляго // Транспортные системы. 2017. № 2. С. 51-54.