

О МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТА УРЕНГОЙСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В статье приведен краткий обзор основных физико-химических свойств разных топлив, в том числе смесей дизельного топлива и газового конденсата. Рассматривается анализ показателей рабочего процесса дизельного двигателя на жидком топливе разного состава. Приведены графическая и аналитическая интерпретация рабочего цикла, горения топлива и изменения давления. Проанализировано влияние свойств жидких стандартного и альтернативного топлив на параметры рабочего процесса. Проанализированы результаты численного моделирования индикаторного процесса дизеля на смеси газового конденсата и стандартного дизельного топлива.

Ключевые слова: работа судового двигателя, цилиндр двигателя, судовые дизели, дизельное топливо, газовый конденсат, индикаторный процесс, цетановое число.

Введение. Применение альтернативного топлива требует оценки последствий широкого внедрения подобных технических мероприятий на протекание рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания и анализа возможных изменений условий эксплуатации судовых энергетических установок.

Техническая возможность использования топлива различных марок в определенных типах дизелей не раз становилась серьезным препятствием на пути решения поставленной задачи, хотя целесообразность решения ее с других позиций (экономической, наличия ресурсов, возможностей снабжения и т.д.) была очевидной. Кроме этого наблюдается неуклонный рост стоимости дизельного топлива в результате истощения запасов легких сортов нефти, увеличения объемов добычи и повышения стоимости переработки тяжелого углеводородного сырья [1].

Совершенствование показателей дизельного двигателя заключается в непрерывном улучшении процессов рабочего цикла. Выполненные теоретические исследования рабочих циклов двигателя требуют отметить, что важно добиваться в каждом конкретном типе двигателя оптимального протекания процесса сгорания [2].

Физико-химическими свойствами используемого топлива определяется протекание рабочего

процесса наравне с конструктивными особенностями. Так, следует учитывать, что работа дизеля на альтернативных видах топлива, отличающихся по физико-химическим свойствам от стандартного дизельного топлива, требует расширения ресурса дизельных топлив и обеспечения «всеядности» самого дизеля [3].

Наилучшие показатели рабочего процесса достигаются при выборе сочетания конструктивных параметров и определении зависимостей основных показателей от различных конструктивных факторов.

В нашей стране в качестве дизельного топлива или его компонента используют газовые конденсаты (ГК), добыча которых непрерывно возрастает, и их использование, особенно в отдаленных труднодоступных районах страны, является важным и экономически выгодным делом [4, 5].

Сохранение основных параметров, таких как мощность и экономичность при переводе дизеля на маловязкое топливо, по способу впрыска является лучшим решением.

На практике в процессе эксплуатации судовых дизелей часто появляется необходимость использования различных видов топлива, которые различаются между собой физико-химическими свойствами. А это, в свою очередь, требует изменения

некоторых регулировочных параметров при эксплуатации двигателя. Одним из таких параметров является давление начала впрыска топлива в форсунке. Так, установленное оптимальное значение давления начала впрыска топлива в форсунке при работе с одним видом топлива для другого вида не является оптимальным, т.к. с изменением вида топлива изменяются его плотность и вязкость, которые, в свою очередь влияют на качество распыливания. Поддержание качества распыливания на требуемом уровне при работе двигателя на различных видах топлив можно частично компенсировать изменением давления начала впрыска топлива в форсунке.

Принимая во внимание вышеуказанное, для обеспечения дизельного двигателя, в частности судового дизеля, топливом, из газового конденсата без серьезной переработки является актуальной научно-технической задачей [6].

Анализ литературных данных и постановка задачи. Применение газового конденсата как топлива для дизелей известно давно. Наиболее значимые месторождения ГК в России сосредоточены в Западной Сибири (месторождения: Уренгойское, Ямбургское, Заполярное, Юбилейное, Медвежье). Достаточно крупные месторождения разведаны и освоены на Сахалине, в Якутии, в Краснодарском и Ставропольском краях, в Астраханской, Оренбургской и Волгоградской областях.

В трудах [5, 6] указывается, что в ЦНИТА был выполнен существенный комплекс исследований работы топливной аппаратуры, а также автотракторных и стационарных дизелей на газовом конденсате Вуктыльского месторождения (Коми). Результаты испытаний определили, что количественное соотношение тяжелых и легких фракций конденсата этих месторождений не полностью соответствует требованиям современного дизельного двигателя, исходя из этого газовый конденсат логично применять либо компаундируя конденсат в разумных соотношениях с сезонным дизельным топливом, либо получая из конденсата широкофракционное дизельное топливо посредством отбора легких фракций, выкипающих до 90–120 °С.

В работе [7] отмечаются результаты глубокого изучения физико-химических и эксплуатационных свойств газоконденсатов некоторых месторождений, а также отдельные результаты их моторных испытаний, разрешающие оценить вероятность применения газовых конденсатов как топлива для

дизелей. В выводах работы подтверждалось, что результаты исследования газовых конденсатов Западной Сибири: месторождений Медвежье, Юбилейное, Уренгойское имеют разницу по фракционному составу, показали принципиальную возможность их применения в качестве дизельного топлива.

В работе [8] приводится анализ показателей рабочего процесса дизельного двигателя на жидком топливе разного состава. Рассмотрено влияние свойств жидких стандартного и альтернативного топлив на параметры рабочего процесса, эксперименты выполнены на стенде с быстроходным дизельным двигателем. Представленный анализ выполненных работ по применению газовых конденсатов в дизельных двигателях разного назначения по данным литературных источников показал, что для условий судового дизеля требуется более тщательная отработка рабочего процесса (процесса сгорания и тепловыделения), в соответствии с режимами нагружения.

При внедрении альтернативных видов топлива необходимо решение ряда задач, одна из которых заключается в определении основных параметров рабочего цикла двигателя и выборе оптимального процентного содержания газового конденсата в дизельном топливе [9].

Исследование работы судового дизеля и физико-химические свойства смесей газового конденсата и дизельного топлива. В статье выполняется исследование работы судового двигателя 6ЧН18/22 на смеси дизельного топлива и газового конденсата в различных пропорциях, добываемого на Уренгойском месторождении.

Основные характеристики газового конденсата Уренгойского месторождения [10]:

Плотность при 20 °	869 кг/м ³
Вязкость кинематическая при 20 °С не менее	5,14 мм ² /с
Цетановое число:	37
Температура застывания:	–68 °С
Содержание серы	0,012 %

В табл. 1 указаны отдельные физико-химические показатели смесей газового конденсата Уренгойского месторождения и моторного топлива в различных пропорциях. Сильное влияние на нормальную работу топливной аппаратуры дизеля оказывают плотность и вязкость топлива, что является показателями качества топлива. При их повышенных значениях ухудшаются процессы распыливания и смешения, а при малых значениях отмечается

Таблица 1

Некоторые физико-химические показатели смесей газового конденсата (ГК) с моторным топливом (ДТ)

Наименование параметра	Обозначение	Состав смеси				
		ДТ	75 % ДТ + + 25 % ГК	50 % ДТ + + 50 % ГК	25 % ДТ + + 75 % ГК	ГК
Кинематическая вязкость при 20 °С	мм ² /с	3	–	–	–	1,4
Плотность при 20 °С	кг/м ³	860	830	822	–	772
Цетановое число	–	45	–	–	–	46
Температура вспышки в закрытом тигле	°С	62	48	35	27	11
Низшая теплота сгорания	Дж/кг	42,5	–	–	–	43,42

Характеристики топливных смесей

Характеристика смеси	100 % дизельного топлива (ДТ)	75 % ДТ + +25 % ГК	50 % ДТ+ + 50% ГК	25% ДТ+ + 75% ГК
Плотность, кг/м ³	850	830	811	791
Содержание углерода, %	0,861	0,852	0,845	0,837
Содержание водорода, %	0,132	0,137	0,141	0,145
Содержание кислорода, %	0,002	0,004	0,008	0,010
Содержание серы, %	0,005	0,008	0,007	0,006

Таблица 3

Данные, используемые в расчете параметров работы дизеля

№	Параметр	Размерность	Обозначение	Значение
1	Мощность	кВт	N_e	225,0
2	Частота вращения коленчатого вала	мин ⁻¹	n	750
3	Номинальная степень сжатия	—	\mathcal{E}	13,4
4	Диаметр цилиндра	мм	D	180
5	Ход поршня	мм	S	220
6	Длина шатуна	мм	$L_{ш}$	440
7	Удельный эффективный расход топлива	г/кВт·ч	g_e	224,0
8	Максимальное давление сгорания	кг/см ²	P_z	60,0
9	Число цилиндров	шт	—	6,0
10	Атмосферное давление	мм рт.ст.	P_a	760,0
11	Температура атмосферного воздуха	°С	T_a	20,0
12	Относительная влажность воздуха	%	—	60,0
13	Коэффициент износа поршневых колец	—	—	0
14	Заданная частота вращения	мин ⁻¹	n	750,0
15	Давление наддува	кг/см ²	P_n	0,5
16	Диаметр распыливающего отверстия	мм	—	0,35
17	Температура надувочного воздуха	°С	T_n	0
18	Угол опережения впрыска топлива	° пкв	—	20
19	Число распыливающих отверстий	шт	—	8,0
20	Среднее давление впрыска топлива	МПа	$P_{вн}$	30,0

падение мощности двигателя и увеличение износа прецизионных деталей топливной аппаратуры.

Можно отметить из табл. 1: плотность и вязкость газового конденсата и смесей ниже, чем у дизельного топлива. Исходя из этого, повышается текучесть смеси и, как результат, затрачивается меньше энергии для подогрева смеси, а также обеспечивается высокое качество распыливания топлива, а следовательно, и интенсификация процесса смесеобразования в цилиндре двигателя. Низшая теплота сгорания, или теплотворная способность газового конденсата немного выше, чем у моторного

топлива, которая будет способствовать улучшению результативности процесса сгорания.

Опасность, с точки зрения коррозии топливной аппаратуры, представляют сернистые соединения, содержащиеся в топливе.

Нагарообразование и увеличение износа происходит из-за повышенного содержания сернистых соединений в дизеле, а также к сокращению моторесурса двигателя. Газовые конденсаты относят к бессернистым (не выше 0,2 %) [11].

Нормальная работа дизельных двигателей, как известно, достигается при цетановом числе топлива

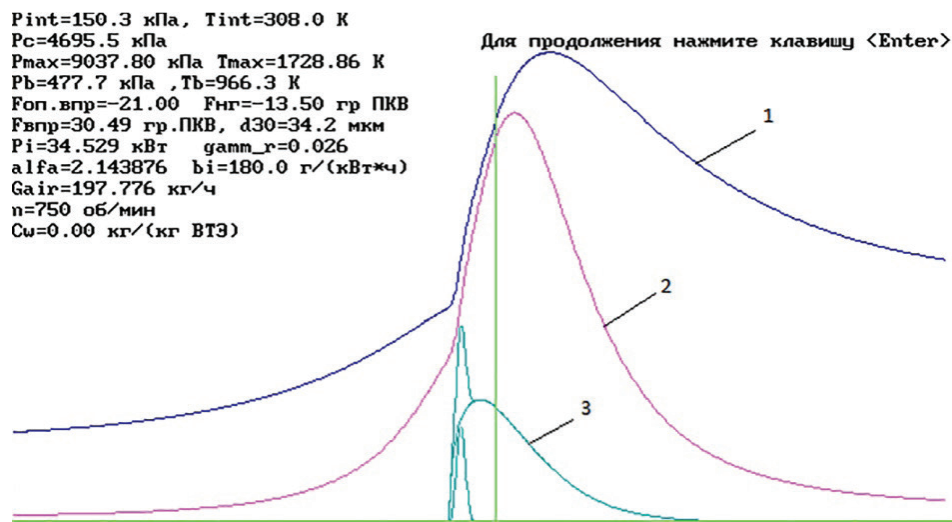


Рис. 1. Диаграмма рабочего процесса двигателя при работе на дизельном топливе:
 график № 1 — изменение работы цикла;
 график № 2 — изменение давления газов;
 график № 3 — процесс выгорания топлива

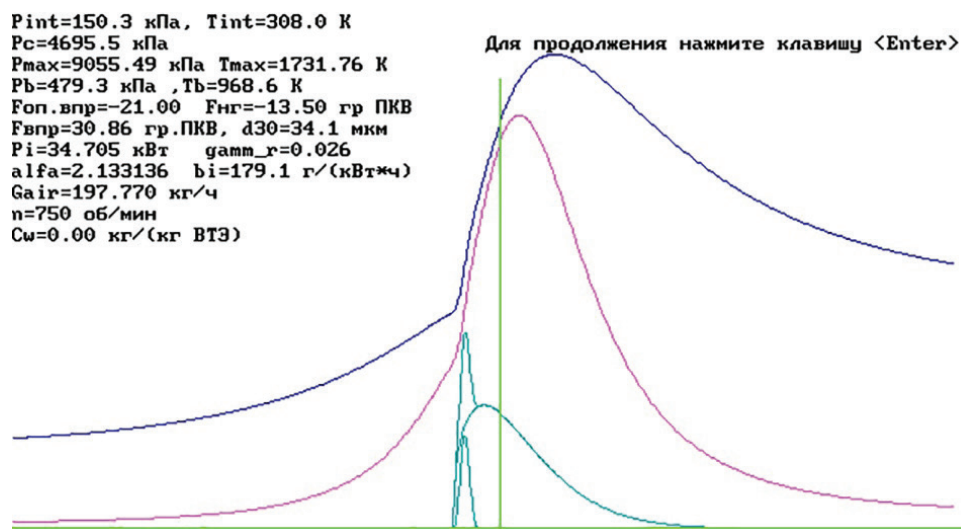


Рис. 2. Диаграмма рабочего процесса двигателя при работе на смеси 75 % ДТ и 25 % ГК

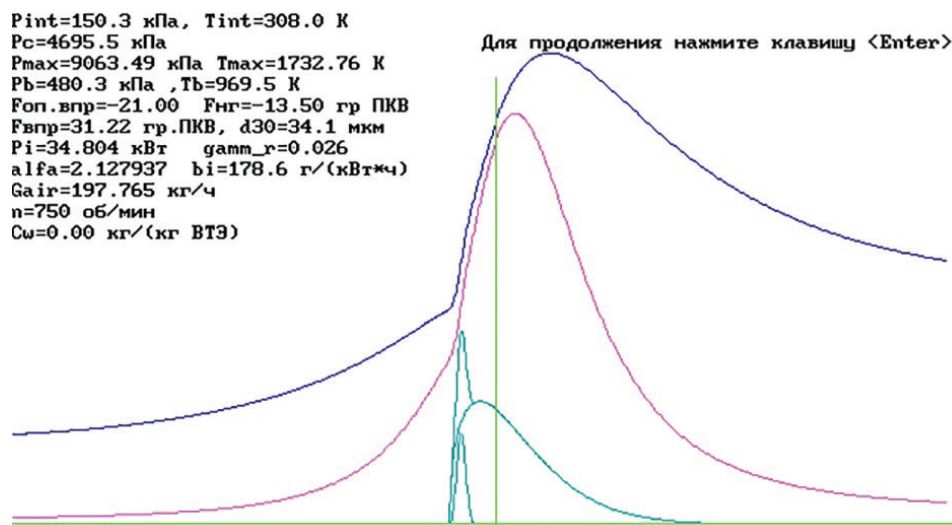


Рис. 3. Диаграмма рабочего процесса двигателя при работе на смеси 50% ДТ и 50% ГК

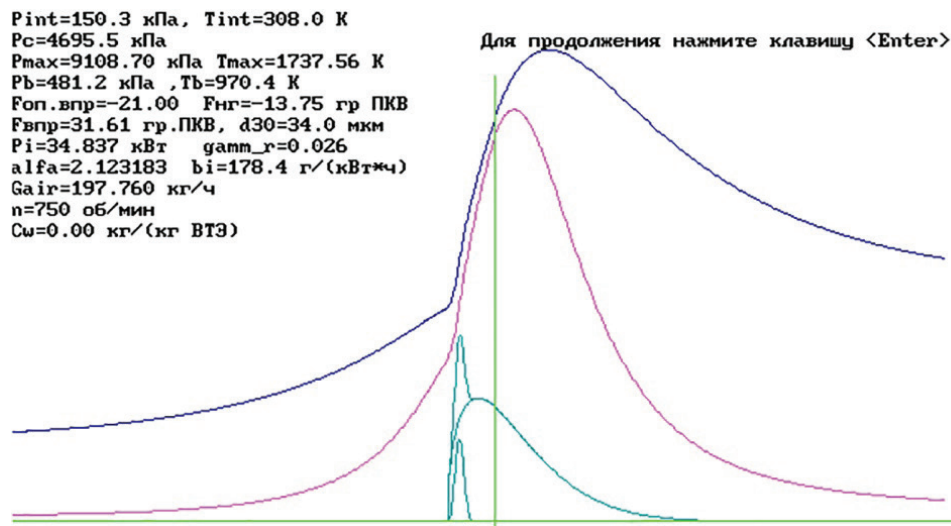


Рис. 4. Диаграмма рабочего процесса двигателя при работе на смеси 25 % ДТ и 75 % ГК

Таблица 4

Значение параметров процесса сгорания при изменении содержания ГК в смеси

Содержания ГК в смеси, %	100 % ДТ	75 % ДТ + 25 % ГК	50 % ДТ + 50 % ГК	25 % ДТ + 75 % ГК
P_{max} , кПа	9037,8	9055,49	9063,49	9108,7
T_{max} , К	1728,86	1731,76	1732,76	1737,56
b_p , г/кВт*ч	180,0	179,1	178,6	178,4

выше 40. Приняв во внимание это, можно отметить, что, как видно из табл. 1, цетановое число исследуемого газового конденсата находится в приемлемых пределах (45–48). Отличие физических свойств топлива табл. 1 выражает определенное влияние на показатели процесса топливоподачи.

С помощью программы «Triton», разработанной в Сибирском государственном университете водного транспорта (СГУВТ) С. А. Калашниковым и О. Л. Лебедевым, проводится исследование рабочего цикла дизеля на персональном компьютере [12].

В табл. 2 указаны характеристики топливных смесей, полученные расчетом, исходя из процентного содержания смеси. Для проведения анализа рабочего цикла в программу были введены следующие параметры, представленные в табл. 3.

Программа «Triton» позволяет произвести расчет цикла дизеля и получить индикаторные диаграммы, максимально приближенные к реальным индикаторным диаграммам, подобным тем, которые можно снять с помощью индикатора непосредственно с работающего дизеля.

Результаты расчета в программе «Triton» представлены на рис. 1–4.

На основании полученных значений параметров рабочего процесса дизеля строится график зависимости основных параметров рабочего цикла дизеля от значения содержания ГК в смеси и определяется оптимальное значение содержания ГК в смеси (рис. 5). Значение параметров процесса сгорания при изменении содержания ГК в смеси приведены в табл. 4.

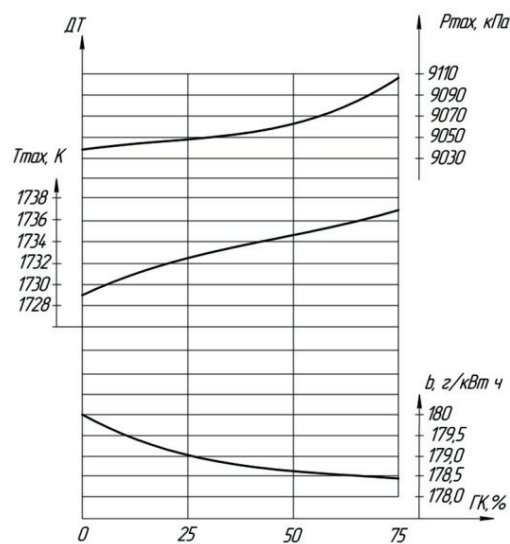


Рис. 5. График зависимости основных параметров рабочего цикла дизеля

При содержании ГК в топливе 75 %, расход топлива наименьший, однако температура и давление цикла имеют наибольшее значение.

Наиболее выгодным режимом является режим работы дизеля на смеси: 50 % ДТ и 50 % ГК. Данная смесь наиболее оптимальна при эксплуатации

по совокупности мощностных, экономических и экологических показателей. При работе на выбранной смеси газового конденсата и дизельного топлива параметры рабочего процесса схожи работой на чистом дизельном топливе.

Индикаторная диаграмма, снятая тем или иным типом индикатора с цилиндра дизеля, является наиболее достоверной информацией о процессах сгорания, топливоподачи и тепловыделения в двигателе и позволяет при соответствующей математической обработке получить весь комплекс показателей и параметров рабочего процесса.

Использование ПЭВМ и соответствующего программного обеспечения позволяет существенно сократить затраты времени и средств на доводку рабочего процесса дизеля, работающего на разных сортах топлива, в том числе альтернативного.

В последнее время особо пристальное внимание уделяется мероприятиям по предотвращению загрязнения атмосферного воздуха отработавшими газами. Совершенствование судовых энергетических установок и ужесточение экологических нормативов выбросов транспортных средств вызывают насущную необходимость применения различных видов альтернативного топлива. Данное направление развития СЭУ требует проведения анализа последствий широкого внедрения подобных технических мероприятий на протекание рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания и оценки возможных изменений условий эксплуатации энергетических установок [13].

Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что применение газовых конденсатов Уренгойских месторождений в качестве топлив для дизельных двигателей является весьма перспективным мероприятием, что может способствовать решению задачи увеличения ресурса дизельного топлива.

Одновременное решение проблем экологии рек и морей, снижения затрат на топливо для СЭУ может быть реализовано более широким использованием на флоте альтернативных видов топлива.

Библиографический список

1. Пахомов Ю. А., Коробков Ю. П., Дмитриевский Е. В. [и др.]. Топлива и топливные системы судовых дизелей. М.: ТрансЛит, 2007. 496 с. ISBN 5-94976-010-7.
2. Бабаев Г. М. Некоторые результаты исследования работы судового дизеля при использовании газоконденсатных топлив // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 8 (75). С. 40–43.
3. Либенфорт Г. Б. Судовые двигатели и окружающая среда. Л.: Судостроение, 1979. 144 с.
4. Луканин В. Н. [и др.]. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / под ред. В. Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2005. 479 с.
5. Свиридов Ю. Б., Пьядичев Э. В., Гиль Л. И. Об использовании газовых конденсатов для работы дизелей // Труды ЦНИТА. 1974. Вып. 60. С. 28–37.
6. Свиридов Ю. Б., Пьядичев Э. В., Гиль Л. И. Исследование работы автомобильных дизелей на смесях Вуктульско-го // Труды ЦНИТА. 1974. Вып. 61. С. 32–37.
7. Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Жданов Н. В., Кузнецова Д. К. Выбор смесительных устройств для получения высокостабильных топливных смесей в системах топливоподготовки энергетических установок // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 241–245.
8. Ведрученко В. Р., Жданов Н. В., Лазарев Е. С. Снижение экономического ущерба от вредных выбросов тепловых двигателей использованием альтернативных видов топлива // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 236–240.
9. Емельянов В. Е., Крылов И. Ф. Альтернативные экологически чистые виды топлива для автомобилей. Свойства, разновидности. М.: АСТ-Астрель, 2004. 128 с.
10. Марков В. А., Гайворонский А. И., Грехов Л. В. [и др.]. Работа дизелей на традиционных топливах. М.: Легион-Автодата, 2008. 464 с. ISBN 978-5-88850-3614.
11. Глазунов А. М., Мозырев А. Г., Гуров Ю. П. [и др.]. Газовый конденсат как источник получения дизельного топлива // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 1. С. 106–112.
12. Ведрученко В. Р., Малахов И. И. Альтернативные виды топлива для судовых дизелей: моногр. Омск: Изд-во Омского института водного транспорта (филиал) НГАВТ, 2012. 173 с. ISBN 978-5-8119-0514-0.
13. Лебедев Б. О., Глушков С. П., Кочергин В. И. Особенности использования альтернативных видов топлива для судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-4 (42). С. 139–143.

ШТИБ Алексей Викторович, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

SPIN-код: 6654-0400

AuthorID (РИНЦ): 904940

Адрес для переписки: shtib93@mail.ru

ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

SPIN-код: 1462-4926

AuthorID (РИНЦ): 514202

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

МАЛАХОВ Иван Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Специальные технические дисциплины» Омского института водного транспорта (филиал) «Сибирского государственного университета водного транспорта».

SPIN-код: 5612-4010

AuthorID (РИНЦ): 647738

Адрес для переписки: mivan.doc@yandex.ru

Для цитирования

Штиб А. В., Ведрученко В. Р., Малахов И. И. О моделировании задачи оптимизации показателей экологичности судовой энергетической установки как сложной технической системы // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 17–22. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-17-22.

Статья поступила в редакцию 30.05.2019 г.

© А. В. Штиб, В. Р. Ведрученко, И. И. Малахов