УДК 62-971.2
DOI: 1037890/jwt.vi85.654

Математическое моделирование подачи газовоздушной смеси в дизельный двигатель при использовании газового устройства

Н.А. Лаптев
ORCID ID: 0009-0004-8069-9516
Ю.И. Матвеев
М.Ю. Храмов
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Судовой дизельный двигатель представляет собой сложную энергетическую установку, для эксплуатации которой необходимы различные системы (воздушная, охлаждения, смазывания, топливная, газораспределения и др.). Для нормальной эксплуатации, судовые дизельные двигатели должны обладать высоким показателем надёжности и эффективностью использования мощности. Однако в последние годы перед учёными, проектировщиками и инженерами ставится новая задача, которая заключается в контроле и снижении вредных выбросов продуктов сгорания. Данные задачи поставлены в первую очередь из-за принятия более строгих экологических норм международными ассоциациями. Главной особенностью решения данной задачи является сохранность околономинальных уровней: эффективности, удельной мощности, надежности и стоимости жизненного цикла судового дизеля. Для перевода дизельного двигателя на смесевые топлива необходимо выполнить ряд модернизационных мероприятий, которые подтверждены теоретическими расчётами и научными исследованиями. В данной статье приводится математическое описание движения газововоздушной смеси, через устройство для раздельной подачи газов, в судовые малоразмерные дизельные двигатели без наддува при работе на комбинированном топливе (дизельное – газовое топлива). Отдельно представлена математическая формализация задачи движения газов в цилиндр двигателя через газовое устройство.
Материал разработан в рамках работы по государственному заданию по сознанию информационно-технологической платформы »Флот-Сервис-Судоремонт».

Ключевые слова: двигатель, газ, воздух, цилиндр, выбросы, эффективность, газовое устройство.

Nikolai A. Laptev
ORCID ID: 0009-0004-8069-9516
Yuri I. Matveev
Mikhail Y. Khramov
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Mathematical modeling of gas-air mixture supply in a diesel engine using a gas device

Abstract. A marine diesel engine is a complex power plant that requires various systems for its operation (air, cooling, lubrication, fuel, etc.). For reliable operation marine diesel engines must possess high reliability and power utilization efficiency. However, in recent years scientists, designers, and engineers have faced a new challenge: reducing harmful combustion emissions. This challenge is driven by the adoption of increasingly stringent environmental regulations. The key aspect of addressing this task is maintaining near-nominal levels of efficiency, specific power, reliability, and lifecycle cost.

The final transition of a diesel engine to combined fuels requires a number of modernization measures which are supported by theoretical calculations and scientific research. This paper presents a mathematical description of the gas-air mixture flow through a device for separate gas supply into small-sized, naturally aspirated marine diesel engines operating on combined fuel (diesel and gas). A mathematical formulation for the problem of gas flow into the engine cylinder through the gas supply device is also provided.

Keywords: engine, gas, air, cylinder, emissions, efficiency, gas device

Введение

Правительством РФ определена энергетическая стратегия сроком на 15 лет от 09.06.2020, где соответствующие акценты расставлены над: стимулированием использования природного газа в качестве газомоторного топлива; увеличением доли природного газа в структуре энергопотребления на транспорте; развития сети газозаправочной инфраструктуры [1].

Особую актуальность приобретает не только поддержание производительности судовых двигателей, но и обеспечение их вклада в снижение воздействия на окружающую среду. Для решения этих задач проводятся многочисленные исследования, направленные на улучшение характеристик судовых двигателей с целью снижения расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ [2]. Исследователи прилагают значительные усилия для улучшения характеристик судовых энергетических установок, применяя как эмпирические, так и теоретические методы.

В процессе разработки идеальных циклов конструктор должен определить, какую модель целесообразно применять для рабочей жидкости внутри цилиндра [3]. Определив термодинамические свойства жидкости, цикл можно упростить, используя различные допущения. Однако несмотря на то, что эмпирические методы дают реальные результаты, проектирование, производство и испытание новых двигателей и систем обходятся дороже, чем теоретические модели, и требуют больших затрат времени. В тоже время, математическая модель цикла двигателя может быть рассчитана с высокой степенью точности с помощью компьютерной программы, основанной на реальных данных [4].

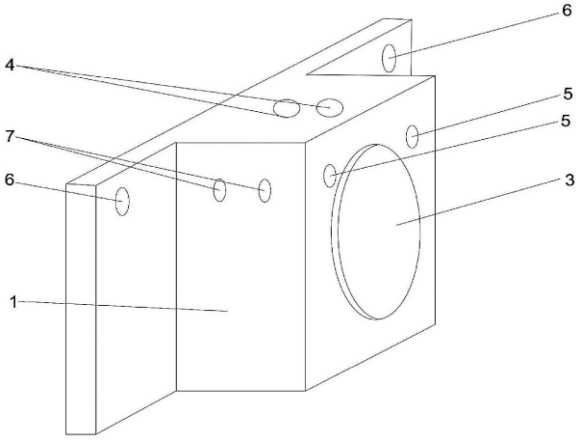
На сегодняшний день было разработано множество моделей процесса работы судового двигателя, включающих термодинамику, турбулентность и химическую кинетику, для прогнозирования его термодинамических параметров [5,6]. С помощью математической модели исследуется изменение показателей работы двигателя при варьировании его параметров в требуемых пределах, что позволяет определить ключевые эксплуатационные характеристики. В тоже время, нерешённой остаётся проблема оптимизации работы судового двигателя, в частности неэффективного сгорания топлива, когда предусматривается работа на двух видах топлива (дизель + газ). Проблема существующих моделей заключается в том, что часто газ и воздух смешиваются слишком рано (на входе в коллектор), это в свою очередь создает слишком большой объем уже готовой смеси, и она плохо подвержена воспламенению и конечному сгоранию.

Цель данной работы заключается в обосновании решения по переоборудованию судового дизельного двигателя для работы на газодизельном топливе и разработке математической модели движения газов (воздуха и топливного) в цилиндр двигателя через газовое устройство.

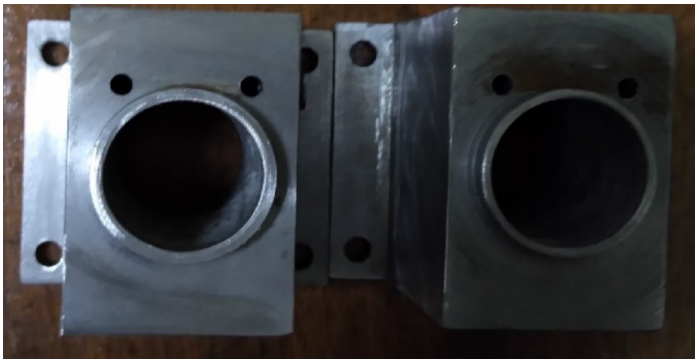
Экспериментальные исследования по использованию традиционных и смесевых видов топлив проводились на модернизированной судовой дизель-генераторной установке, которая показана на рис. 1.

Рис. 1. Модернизированная дизель-генераторная установка для работы на традиционных и смесевых видах топлив

Для улучшения процесса сгорания газовоздушной смеси непосредственно в цилиндре дизельного двигателя разработано устройство для раздельной подачи газов в дизельный двигатель, состоящее из корпуса, выполненного Т-образным образом в продольном сечении (см. рис. 2) [7]. Данный модуль устанавливается взамен впускного коллектора на каждую головку блока цилиндров (судовой дизельный двигатель 4Ч 8,5/11, (см. рис. 1)) и служит векторозадающим устройством для потока газового топлива и воздушного заряда (см. рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. а) Модуль для раздельной подачи газового топлива в дизельный двигатель
б) Общий вид устройства для раздельной подачи газов

На рис. 2 а) - корпус оснащен двумя функциональными блоками, которые представлены основным кубическим блоком и задним основанием. Внутри корпуса 1 выполнено сквозное продольное центральное отверстие с впускным окном 3 и выпускным окном 2 для воздушной смеси. В верхней части корпуса 1 над сквозным центральным отверстием 3 выполнены два продольных параллельных сквозных канала 5 для дополнительного газового топлива. Сверху кубического блока перпендикулярно сквозному центральному отверстию 3 выполнены два параллельных глухих впускных окна 4 для дополнительного газового топлива, сообщенные со сквозными каналами 5 для дополнительного газового топлива, 6 - отверстия для креплений, 7 – технические отверстия.

Технический результат предложенной конструкции газового устройства заключается в возможности улучшения процесса сгорания газовоздушной смеси в цилиндре дизельного двигателя, а также в уменьшении объема смешивания газового топлива и воздушной смеси на входе в надклапанное пространство головки блока цилиндров (ГБЦ) дизельного двигателя.

Рассмотрим более детально математическую формализацию предложенного решения, в рамках которого воздух и газ подаются раздельно до впускного клапана, расположенного в ГБЦ дизеля.

Гидродинамика потоков

Согласно предложенной в патенте схеме [7], основная функция разработанного устройства заключается в раздельной подаче двух сред. Тогда расходы могут быть описаны с помощью уравнения неразрывности.

Массовый расход воздуха

Массовый расход воздуха ($\dot{m}_{air}$) через площадь центрального отверстия (A_{air},м^2) (впускное окно 3, рис. 2-а) рассчитывается следующим образом:

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \cdot A_{air} \cdot v_{air} \,, \quad (1)$$

Площадь сечения A_{air} является конструктивным параметром устройства, где ρ_{air} – плотность воздуха, а v_{air} скорость его движения.

Массовый расход газа

Суммарный массовый расход газа ($\dot{m}_{gas}$) через два параллельных канала с суммарной площадью поперечного сечения (A_{gas}, м^2) (5, рис. 2-а)) равен:

$$\dot{m}_{gas} = \rho_{gas} \cdot A_{gas} \cdot v_{gas} \,, \quad (2)$$

Площадь сечения A_{gas} является конструктивным параметром устройства, где ρ_{gas} – плотность воздуха, а v_{gas} скорость его движения.

Этот расход регулируется внешними системами подачи, и именно его контроль позволяет управлять составом смеси, влияя на конечный показатель коэффициента избытка воздуха [8].

Перепад давления

Двигатель на такте впуска создает разрежение во впускном коллекторе. Именно этот перепад давления ($\Delta P = P_{atm} - P_{vlv}$) является движущей силой для потока воздушного заряда. P_{vlv} – является конечным давлением перед впускным клапаном, а P_{atm}- давление атмосферного воздуха.

Формула расхода с учетом гидравлического сопротивления

Расход через канал зависит не только от площади А, но и от его гидравлического сопротивления (формы, шероховатости). Автор предлагает выразить эту зависимость через уравнение Бернулли для реальной жидкости:

$$m = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta P}\,, \quad (3)$$

где, μ – коэффициент расхода (безразмерный), который учитывает сжатие струи и потери на трение. Для коротких каналов, как в предложенном устройстве, его можно принять в диапазоне 0,6 – 0,8.

Представленная выше формула более точно связывает конструктивный параметр (A – площадь поперечного сечения канала) с рабочими параметрами двигателя (ΔP). Таким образом, из 3 для воздуха и газа получаем следующие выражения:

– расход воздуха:

$$\dot{m}_{air} = \mu_{air} \cdot A_{air} \cdot \sqrt{2\rho_{air} \cdot \Delta P}\,, \quad (4)$$

– расход газа:

$$\dot{m}_{gas} = \mu_{gas} \cdot A_{gas} \cdot \sqrt{2\rho_{gas} \cdot (P_{gas_{supply}} - P_{vlv})}\,, \quad (5)$$

где $P_{gas_{supply}}$ — давление в магистрали подачи газа, которое можно регулировать для управления расходом $\dot{m}_{gas}$.

Термодинамика и состав смеси

Как известно, ключевым параметром для процесса сгорания является соотношение воздуха и топлива [9]. Рассмотрим несколько релевантных показателей.

Коэффициент избытка воздуха

С использованием коэффициента избытка воздуха (безразмерная величина λ) можно определить насколько реальная смесь «богаче» или «беднее» стехиометрической (идеальной):

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{air.fl}}{\dot{m}_{mix} \cdot L_{fuel}}\,, \quad (6)$$

Параметр L_{fuel} – стехиометрическое число, которое является безразмерным и постоянным для конкретного вида топлива и варьируется в зависит от процентного содержания конкретного вида топлива в смеси (L_0 - для пропан-бутана, $L_0 \approx 15.7$ кг/кг; L_{do} - для дизельного топлива, $L_{do} \approx 14.7$ кг/кг), тогда процентное содержание можно выразить через массовые расходы обеих сред m_{mix}:

$$m_{mix} = m_{do} + m_{gas} = 1\,, \quad (7)$$

где m_{do} - массовый расход дизельного топлива (кг/час), а m_{gas} – массовый расход пропан-бутанового топлива (кг/час).

Тогда:

$$L_{fuel} = L_0 * (m_{mix} - m_{do}) + L_{do} * (m_{mix} - m_{gas})\,, \quad (8)$$

Так как газодизельное топливо состоит из ДТ и пропан-бутановой смеси, то числитель $\dot{m}_{air.fl}$ будет зависеть от процентного соотношения массового расхода ДТ m_{airdo} и пропан-бутановой ($\dot{m}_{airgas}$) смеси в составе газодизельного топлива. Тогда $\dot{m}_{air.fl}$ будет иметь вид:

$$\dot{m}_{air.fl} = \dot{m}_{airgas} * (m_{mix} - m_{do}) + m_{airdo} * (m_{mix} - m_{gas}), \quad (9)$$

Конечный вид формулы после преобразования:

$$\dot{m}_{air.fl} = \dot{m}_{airgas} * m_{gas} + m_{airdo} * m_{do}, \quad (10)$$

Подставив 7, 8 и 10 в уравнение 6 получится:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{airgas} * m_{gas} + m_{airdo} * m_{do}}{(L_0 + L_{do}) \cdot (\dot{m}_{gas} + m_{do})}, \quad (11)$$

В дизельных двигателях, работающих на газовом топливе, обычно поддерживается обедненная смесь (λ>1). Устройство позволяет дозировать $\dot{m}_{gas}$ для поддержания оптимального коэффициента избытка воздуха.

Влияние коэффициента избытка воздуха на крутящий момент и мощность

Индикаторный КПД двигателя (η_i) и, следовательно, его крутящий момент, нелинейно зависят от коэффициента избытка воздуха (λ) [10].

1. Максимальная мощность обычно достигается при незначительно обогащенной смеси (λ ≈ 0,85 – 0,95).
2. Максимальная экономичность (минимальный удельный расход топлива) достигается при обедненной смеси (λ ≈ 1,1 − 1,2).
3. В газодизельном режиме, чтобы избежать детонации и обеспечить стабильное горение, работа происходит на обедненных смесях (λ > 1,15-1,3) [11] .

Описанную выше зависимость можно выразить следующим образом:

$$P_e = f(\lambda, n), \quad (12)$$

где P_e – эффективная мощность, n - частота вращения коленвала.

В процессе проектирования инженерная задача заключается в нахождении такой зависимости $\dot{m}_{gas} = f(n)$, которая позволит поддерживать оптимальное значение коэффициента избытка воздуха (λ) на всех режимах работы.

Также стоит отметить, что в зависимости от режима нагрузки двигателя коэффициент избытка воздуха (λ) - меняется, уменьшаясь при увеличении нагрузки [10]. Используя газоанализатор марки ДАГ-510, был выявлен состав отработавших газов судового малоразмерного дизельного двигателя типа 4Ч 8,5/11 на различных режимах работы при использовании двух типов топлив. В таблицах 1 и 2 в зависимости от нагрузки и типов применяемых топлив указаны: значения коэффициента избытка воздуха (λ); температуры отработавших газов на выходе из коллектора (T_{eg}); содержание кислорода не участвовавшего в процессе сгорания топлива (O_{2_F}), а также содержание углекислого газа (CO_2). Таблицы заполнялись на основе проведённых экспериментальных исследований в лаборатории ФГБОУ ВО «ВГУВТ».

Таблица 1

Температура, состав основных отработавших газов и коэффициент избытка воздуха на различных режимах работы при использовании дизельного топлива.

Режим работы, %	T_{eg}, ºC	O_{2_F}, %	CO_2, %	λ
100	337	6,28	10,08	1,35
75	293	9,52	7,77	1,7
50	248	11,62	6,32	2,06

Таблица 2

Температура, состав основных отработавших газов и коэффициент избытка воздуха на различных режимах работы при использовании комбинированной системы – дизельное – газовое топлива.

Режим работы, %	T_{eg}, ºC	O_{2_F}, %	CO_2, %	λ
100	321	7,68	9,16	1,48
75	309	7,74	9,08	1,49
50	270	8,58	8,14	1,56

Математическое обоснование целесообразности применения газового устройства

Ключевой результат, который достигается при использовании газового устройства, заключается в уменьшение объема предварительного смешивания[12]. Он может быть формализован следующим образом.

Объем смешивания (V_{mix})

Для прототипа (например, газовый смеситель): смешивание происходит в самом смесителе (V_{mixer}) и затем в надклапанном пространстве ГБЦ двигателя (V_{vlv}).

$$V_{mix,prototype} = V_{mixer} + V_{vlv}\ , \tag{13}$$

Для газового устройства: конструкция обеспечивает раздельную подачу. Смешивание начинается только после устройства, т.е. непосредственно в надклапанном пространстве ГБЦ, а затем в цилиндре двигателя.

$$V_{mix,invention} = V_{vlv}\ , \tag{14}$$

Формула уменьшения объема смешивания

С учетом вышеизложенного, абсолютное уменьшение объема смешивания (ΔV_{mix}) равно объему самого смесителя, который был исключен из системы:

$$\Delta V_{mix} = V_{mix,prototype} - V_{mix,invention} = (V_{mixer} + V_{vlv}) - V_{vlv} = V_{mixer}\ , \tag{15}$$

Влияние коэффициента избытка топлива на эффективность сгорания топлива

Улучшение процесса сгорания (η_c) является следствием уменьшения объёма смешивания V_{mix}. Доказательство и формализация точной формулы этой зависимости является нетривиальной задачей, поскольку она достаточно сложна и зависит от множества факторов [13, 14]. В рамках проводимого исследования предлагаем выразить это в виде концептуальной зависимости:

$$\eta_c = f(\lambda, V_{mix}, T_{com}, H_{com})\ , \tag{16}$$

где T_{com} и H_{com} – температура и давление в камере сгорания.

В описании к газовому устройству указано, что уменьшение V_{mix} приводит к созданию более стратифицированного заряда в цилиндре. В некоторых режимах работы дизельного двигателя это предотвращает детонацию, обеспечивает более плавное и полное сгорание, что ведет к улучшению процесса сгорания [15]. Следовательно, можно утверждать следующее:

$$\frac{\partial \eta_c}{\partial V_{mix}} < 0\ , \tag{17}$$

Это означает, что процесс сгорания η_c улучшается при уменьшении объема предварительного смешивания V_{mix}.

Выводы

1) Таким образом, представленная математическая модель комплексно описывает работу устройства для раздельной подачи газов. Она позволяет связать его конструктивные параметры с рабочими характеристиками двигателя, математически обосновывает заявленное преимущество в виде уменьшения объема предварительного смешивания и дает инженерный инструмент для проектирования и расчета. Модель подтверждает, что предложенная конструкция является технически обоснованным решением для повышения эффективности газодизельных двигателей. Используя предложенные формулы, представляется возможным рассчитать необходимые диаметры каналов и режимы подачи газа для достижения требуемых характеристик работы двигателя.

2) В статье изложен вариант решения проблемы низкой эффективности сгорания в судовом дизельном двигателе с помощью специального устройства для подачи газов Т-образной формы. Отличительная особенность данного устройства заключается в его конструкции, которая физически разделяет потоки: воздух идет по одному большому центральному каналу, газ идет по двум отдельным, параллельным каналам меньшего размера, расположенным над воздушным. Такое разделение предотвращает преждевременное смешивание газов на входе ГБЦ дизеля. Это, в свою очередь, напрямую улучшает процесс сгорания смеси уже в цилиндре, что и является основной целью использования устройства для раздельной подачи газов в цилиндр.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». – [Электронный ресурс].
   – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/#0
2. Кавтарадзе Р.З., Касько А.А., Зеленцов А.А. Расчетно-экспериментальное исследование рабочего процесса перспективного роторно-поршневого двигателя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 4 (745). – С. 61–71. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-23-33.
3. Моренко И.В. Математическое моделирование структур газожидкостного течения в кольцевом канале с внутренним вращающимся цилиндром // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56. – № 1. – С. 105–113. – DOI: 10.31857/S0040357122010101.
4. Guo J., Guo L. Study on the Simplification Calculation Model of Marine Diesel Engine Exhaust Flow Based on Air-Fuel Ratio // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 9479987. – P. 1–11. – DOI: 10.1155/2022/2890035.
5. He H., Yu N., Di S., Cai G., Zhou C., Zheng L. Static Equilibrium Characteristics of Full-Flow Staged Combustion Cycle Engine Under Different Propellants // International Journal of Aerospace Engineering. – 2024. – Vol. 2024. – Article ID 5531867. – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2024/7114250.
6. Максимов Ф.А., Нигматуллин В.О. Метод гибридных сеток в задачах внешней и внутренней газовой динамики // Компьютерные исследования и моделирование, 2023, т. 15, № 3, с. 543-565. – DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-3-543-565.
7. Патент № 2843053 C1 Российская Федерация, МПК F02M 21/02, F02M 35/10, F02M 35/16. устройство для раздельной подачи газов в дизельный двигатель : заявл. 06.12.2024 : опубл. 07.07.2025 / Ю. И. Матвеев, А. К. Лаптев, Н. А. Лаптев. – EDN NYGOZL.
8. Сеначин П.К. Самовоспламенение локального объёма в газодизеле // Двигатель – 97: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – С. 127–130. – [В сборнике: 312 с.].
9. Исаев, А. П. Разработка и исследование принципа комбинированного смесеобразования в двигателях внутреннего сгорания / А. П. Исаев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2011. – № 2. – С. 74-83. – EDN OCOOMD..
10. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е., Новичков М.Ю. Теоретические принципы моделирования рабочих процессов двигателей при работе на альтернативных топливах // Сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. «Транспорт, экология – устойчивое развитие». – Варна: Технический университет, 2004. – С. 213–218. – [В сборнике: 428 с.].
11. Володин В.В. Теоретическое обоснование применения эффекта эжекции в системах подачи газообразного топлива в двигатель и моделирование параметров его работы // Вестник Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. – 2012. – № 11. – С. 90–94.
12. Патрахальцев Н.Н. Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив / Н.Н. Патрахальцев. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – 267 с. – ISBN 978-5-209-03252-1.

13. Карнаухова И. В., Карнаухов В. Н., Захаров Д. А., Карнаухов О. В., Рындина О. В. Влияние коэффициента избытка воздуха на расход топлива дизельными двигателями внутреннего сгорания // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. №. 5. С. 38-42
14. Кавтарадзе, Р. З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р. З. Кавтарадзе. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2011. – 240 с. – ISBN 978-5-7038-3482-4. – EDN ZCKZYN.
15. Природный газ как альтернатива жидким углеводородам на судах с дизельной установкой / Ю. И. Матвеев, Н. А. Лаптев, В. В. Колыванов, М. Ю. Храмов // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 75. – С. 127-135. – DOI 10.37890/jwt.vi75.359. – EDN LERNPN.

References

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020 No. 1523-r «On the Approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2035». – [Online]. – Available: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810/#0
2. Kavtaradze R.Z., Kasko A.A., Zelentsov A.A. Computational and Experimental Study of the Working Process of a Promising Rotary Piston Engine. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 4 (745), pp. 61–71. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-23-33.
3. Morenko I.V. Mathematical Modeling of Gas-Liquid Flow Structures in an Annular Channel with an Inner Rotating Cylinder. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2022, vol. 56, no. 1, pp. 105–113. DOI: 10.31857/S0040357122010101.
4. Guo J., Guo L. Study on the Simplification Calculation Model of Marine Diesel Engine Exhaust Flow Based on Air-Fuel Ratio. Mathematical Problems in Engineering, 2022, vol. 2022, Article ID 9479987, pp. 1–11. DOI: 10.1155/2022/2890035.
5. He H., Yu N., Di S., Cai G., Zhou C., Zheng L. Static Equilibrium Characteristics of Full-Flow Staged Combustion Cycle Engine Under Different Propellants. International Journal of Aerospace Engineering, 2024, vol. 2024, Article ID 5531867, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2024/7114250.
6. Maksimov F.A., Nigmatullin V.O. A Hybrid Grid Method for External and Internal Gas Dynamics Problems. Computer Research and Modeling, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 543-565. DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-3-543-565.
7. Patent RU 2843053 C1. Russian Federation, IPC F02M 21/02, F02M 35/10, F02M 35/16. Device for Separate Gas Supply to a Diesel Engine: filed 06.12.2024: published 07.07.2025 / Matveev Yu. I., Laptev A. K., Laptev N. A. – EDN NYGOZL.
8. Senachin P.K. Auto-Ignition of a Local Volume in a Gas-Diesel Engine. Engine – 97: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Moscow, BMSTU Publ., 1997, pp. 127–130. [In the collection: 312 p.].
9. Isaev A.P. Development and Research of the Combined Mixture Formation Principle in Internal Combustion Engines. Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology, 2011, no. 2, pp. 74-83. EDN OCOOMD.
10. Galyshev Yu.V., Magidovich L.E., Novichkov M.Yu. Theoretical Principles of Modeling Working Processes in Engines Operating on Alternative Fuels. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Transport, Ecology – Sustainable Development». Varna, Technical University, 2004, pp. 213–218. [In the collection: 428 p.].
11. Volodin V.V. Theoretical Justification for the Use of the Ejector Effect in Systems for Supplying Gaseous Fuel to an Engine and Modeling of Its Performance Parameters. Vestnik of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, 2012, no. 11, pp. 90–94.
12. Patrakhaltsev N.N. Improving the Economic and Environmental Qualities of Internal Combustion Engines Based on the Use of Alternative Fuels. Moscow, RUDN University Publ., 2008, 267 p. ISBN 978-5-209-03252-1.
13. Karnaukhova I.V., Karnaukhov V.N., Zakharov D.A., Karnaukhov O.V., Ryndina O.V. INFLUENCE OF THE AIR EXCESS RATIO ON THE FUEL CONSUMPTION OF DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINES. Vestnik of Bryansk State Technical University, 2016, no. 5, pp. 38-42. DOI: https://doi.org/10.12737/article_58f9c4d93ed083.05626092.

14. Kavtaradze R.Z. Thermophysical Processes in Diesel Engines Converted to Natural Gas and Hydrogen. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2011, 240 p. ISBN 978-5-7038-3482-4. EDN ZCKZYN.
15. Matveev Yu.I., Laptev N.A., Kolyvanov V.V., Khramov M.Yu. Natural Gas as an Alternative to Liquid Hydrocarbons on Ships with Diesel Plants. Scientific Problems of Water Transport, 2023, no. 75, pp. 127-135. DOI: 10.37890/jwt.vi75.359. EDN LERNPN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лаптев Николай Александрович, аспирант кафедры эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта»; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: laptevlna@gmail.com

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: matveeveseu@mail.ru

Храмов Михаил Юрьевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок, Волжский государственный университет водного транспорта; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: m.u.hramov@yandex.ru

Nikolai A. Laptev, assistant of the Operation of the Ship's power plants Department, Volga State University of Water Transport; 603950, 5 Nesterova st, Nizhny Novgorod, Russia

Yuri I. Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Operation of the Ship's power plants, Volga State University of Water Transport, 603950, 5 Nesterova st, Nizhny Novgorod, Russia

Mikhail Y. Khramov, Ph.D. of Technical Science, Associate Professor, Volga State University of Water Transport, 603950, 5 Nesterova st, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail:m.u.hramov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; принята к публикации 05.11.2025; опубликована онлайн 20.12.2025. Received 29.09.2025; published online 20.12.2025.