

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru
Мащенко Владимир Юрьевич —
кандидат технических наук,
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»
masvladimir@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gavrilov Vladimir Vasilyevich —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gavrilov@VG5647.spb.edu
Mashchenko Vladimir Yurievich —
PhD, Senior Lecturer.
Saint-Petersburg State Marine Technical
University
masvladimir@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

УДК 621.436

**А. А. Иванченко,
И. А. Щенников,
А. А. Иванченко**

ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СУДОВОГО ВЫСОКОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ М482

В статье рассмотрены современные подходы к математическому моделированию внутрицилиндрового процесса, их основные преимущества и недостатки. Обосновано использование фундаментальных закономерностей смесеобразования и сгорания для решения оптимизационных задач по математическому моделированию экологических и эксплуатационных показателей судовых дизелей. Изложены теоретические основы протекания процессов тепловыделения в цилиндре судового дизеля. Предложена методология математического описания и управления процессом сгорания в цилиндре, основанная на использовании упрощённых полуэмпирических моделей и результатов экспериментальных работ. Проведена расчетно-экспериментальная апробация предложенного подхода при исследовании рабочего процесса судового дизельного двигателя М482 (12 ЧН18/20) с аккумуляторной топливной аппаратурой. Обоснованы рекомендации по дальнейшему улучшению рабочего процесса и характеристик топливной аппаратуры дизельного двигателя. Проведено обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований с формированием расчётной универсальной характеристики расхода топлива. Сделан вывод о возможности дальнейшей модернизации исследуемого дизеля.

Ключевые слова: эмиссия оксидов азота, эксплуатационные показатели, математическое моделирование внутрицилиндрового процесса.

Введение

Ужесточение норм эмиссии NO_x, SO_x и CO₂ для дизельных установок судов выдвигает перед разработчиками судовых дизелей все более сложные и противоречивые задачи, связанные с качеством рабочего процесса и улучшением их эксплуатационных показателей, ставит в ряд актуальнейших проблем задачу внедрения системных принципов в управление процессом сгорания топлива.

Стремясь сократить расходы на доводку дизеля, ведущие разработчики заявили о создании сложных расчетных моделей, основанных на дифференциальных уравнениях гидродинами-

ки неразрывности жидкости, законах сохранения количества движения и энергии и дополненных уравнениями химической кинетики сгорания углеводородных топлив с реализацией расчетного цикла методом конечных объемов. В современных прикладных программах реализованы те или иные подходы к математическому описанию внутрицилиндровых процессов. Наиболее известны следующие программы: KIVA (Los Alamos); FIRE (AVL); VECTIS (Ricardo), GT-Power (Gamma Technologies), STAR-CD (Computational Dynamics Ltd), принципы функционирования которых приведены в работах [1], [2]. В рассмотренных публикациях отмечается недостаточная полнота наших представлений о физических и химических механизмах. Связанная с этим недоведенность указанных моделей и сложности в их использовании, сложность и быстротечность процесса сгорания в дизеле, а также требующийся для реализации моделей большой объем предварительных экспериментальных исследований явились причиной закрепления в практике доводки дизелей управления этим процессом посредством оптимизации одного какого-либо выбранного показателя его работы. Соответственно в практике решения тех или иных задач и, особенно, задач, направленных на улучшение эксплуатационных показателей дизеля и снижение вредных выбросов с отработавшими газами, экспериментальные методы, благодаря своей простоте и доступности, намного опередили теорию и, в основном, являются единственными. В этих условиях становится необходимой и обоснованной разработка методологии управления процессом сгорания. Экспериментальные исследования процесса сгорания топливовоздушной смеси в дизелях в настоящее время проводятся большим количеством авторских коллективов как в России, так и за рубежом, среди них отметим работы [3] – [6]. В работе [5] для решения задач, связанных с достижением допустимого уровня выбросов окислов азота приемлемого уровня дымности и топливной экономичности дизельного двигателя, предложено обращаться к анализу фундаментальных закономерностей смесеобразования и сгорания с дополнительным привлечением результатов экспериментальных работ.

Разработка методологии математического описания и управления процессом сгорания с целью улучшения эксплуатационных и экологических параметров дизельного двигателя

Известно, что преобладающая доля топлива, впрыснутого в цилиндр дизеля к моменту воспламенения, сосредоточена в объеме топливно-воздушных факелов в виде капель. Закономерности протекания процесса сгорания, образования окислов азота и сажи при этом существенно зависят от закона топливоподачи $g(\tau)$, от характеристик топливно-воздушных факелов, сформировавшихся за период задержки воспламенения — l , γ , v , от условий взаимодействия сосредоточенного в их объеме топлива с воздушным зарядом и стенками камеры сгорания (характеризуемые локальными α , процессами тепло- и массообмена между каплями и окружающей ее средой). Все эти параметры определяют состояние рабочего тела в каждый момент цикла: давление $P(x, y, z, \tau)$, температуру $T(x, y, z, \tau)$, концентрационную неоднородность $C_i(x, y, z, \tau)$, а также внешние показатели дизеля (мощность, экономичность, токсичность, дымность, механическую и тепловую напряженность дизеля).

Определенные возможности для выработки методологии математического описания и управления процессом сгорания с целью достижения допустимого уровня выбросов окислов азота, приемлемого уровня дымности и топливной экономичности открывает совместное использование модели локального очага горения, разработанной в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и представленной в работах [7], [8], и модели численного моделирования рабочего процесса ДВС (дизелей, газовых двигателей и газодизелей) [9]. Предпосылками к этому являются большое количество экспериментальных и теоретических исследований, выполненных с целью улучшения экологических показателей дизелей, и исследования условий образования сажи и окислов азота в реальных условиях дизельного цикла, что дает, в сущности, для теории вспомогательный материал.

Приведенные в работе [10] исследования показывают, что наибольшее влияние на характер закона сгорания топлива в дизеле оказывают характеристики топливовоздушной смеси в момент

самовоспламенения, динамика развития и геометрия топливовоздушных факелов, динамика изменения значений локальных коэффициентов избытка воздуха в различных зонах камеры сгорания (α) и интенсивность испарения (горения) топлива. Таким образом, можно предположить, что наибольшей эффективностью при улучшении эксплуатационных показателей судового дизеля отличаются мероприятия, направленные на рационализацию закона подачи топлива и управление процессом самовоспламенения. В качестве управляемых параметров в рамках предлагаемого подхода заслуживают рассмотрения цикловая подача, угол опережения впрыскивания топлива, закон изменения давления подачи топлива, размер и расположение сопловых отверстий и другие показатели.

С учетом изложенного, положительные результаты при исследованиях и оптимизации закона горения топлива в дизеле можно получить, используя упрощенные полуэмпирические модели, для настройки которых не требуется проведения подробных экспериментальных исследований.

Для рассматриваемого типа моделей наибольшее распространение в отечественной мировой практике получила зависимость профессора И. И. Вибе и ее производные, полученные на основе качественных представлений о скорости цепных реакций в цилиндре дизеля. В дифференциальной форме зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{dx}{d\varphi} = -c \cdot \frac{(m+1)}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_z} \right)^m e^{c \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{нс}}}{\varphi_z} \right)^{m+1}}, \quad (1)$$

где x — текущая доля выгоревшего топлива; φ — текущий угол п.к.в.; $\varphi_{\text{нс}}$ — угол начала видимого сгорания топлива; c — коэффициент, зависящий от доли прореагировавшего топлива; φ_z — условная продолжительность сгорания; m — показатель характера сгорания.

Расчетно-экспериментальная апробация предлагаемого подхода

В качестве примера использования полуэмпирической модели сгорания топлива в цилиндре дизеля (1) для решения практических задач и выработки рекомендаций по улучшению эксплуатационных и экологических показателей дизеля рассмотрим исследования рабочего процесса опытного судового дизельного двигателя 12 ЧН 18/20 (рис. 1) с аккумуляторной топливной системой, подробное исследование параметров которого (с проведением индицирования рабочего процесса) представлено в работе [11].

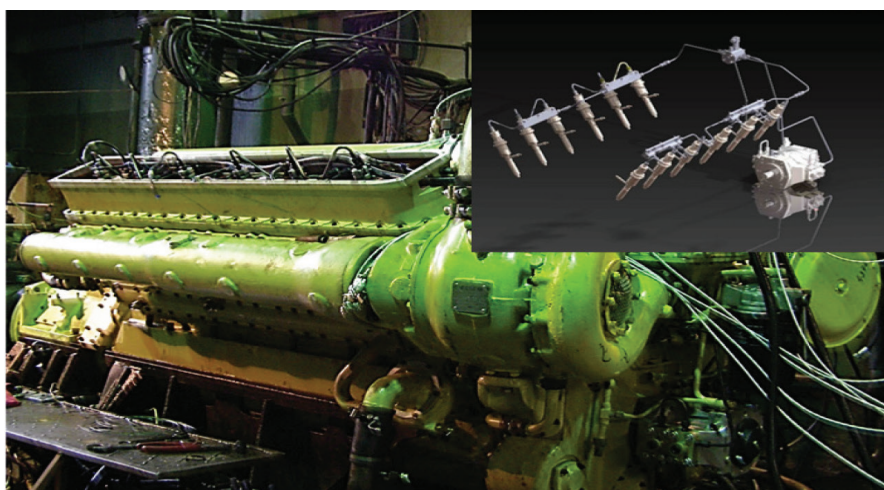


Рис. 1. Судовой дизель М 482 (12ЧН18/20) с аккумуляторной топливной аппаратурой

Определение настроечных показателей математической модели выгорания топлива проводилось при помощи построения так называемых логарифмических анаморфоз выгорания топлива, которые получались путем математической обработки экспериментальных индикаторных диа-

грамм давления газов в цилиндре дизеля, полученных с использованием методики, изложенной в [3]. Пример диаграммы представлен на рис. 2.

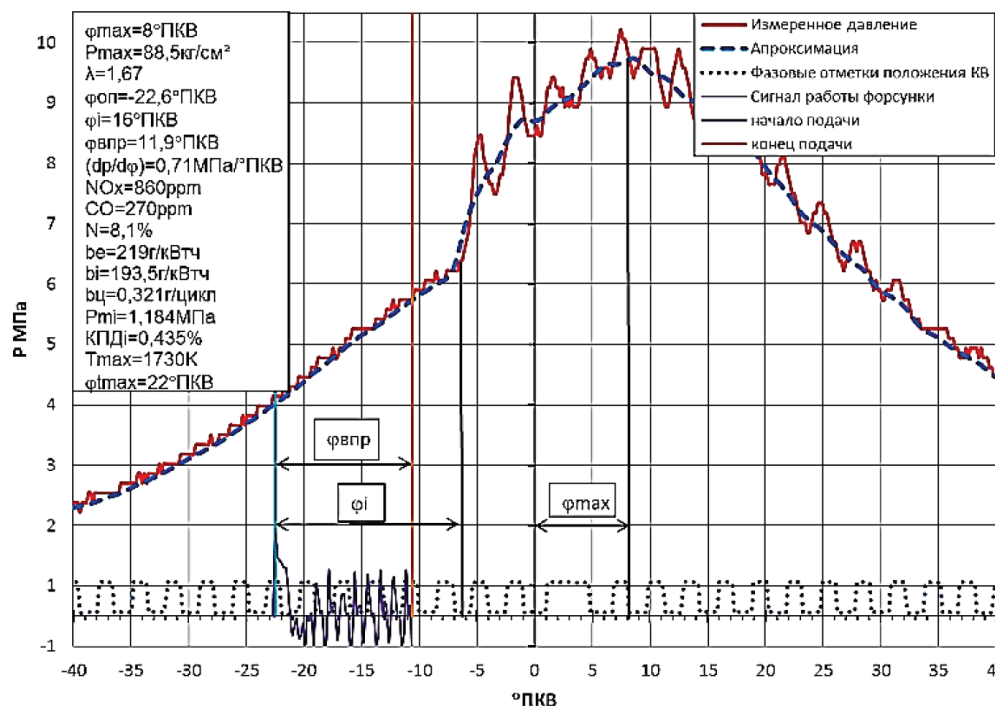


Рис. 2. Индикаторная диаграмма (пример)

В исследовании использовались экспериментальные и расчетные данные о рабочем процессе дизеля с различными настройками топливной аппаратуры. В качестве математической модели для решения поставленных задач использован программный комплекс ИМПУЛЬС, дополненный алгоритмом для расчета образующихся оксидов азота.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований по оптимизации настроек топливоподачи на номинальном режиме работы дизеля приведены в работе [12]. Они показывают, что опытный дизель с аккумуляторной ТА по большинству эксплуатационных характеристик соответствует своему прототипу. На $6 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$ улучшился расход топлива на номинальном режиме, существенно улучшились показатели дымности ОГ (N). Вместе с тем исследования показали, что зона экономичной работы дизеля не соответствует вероятным эксплуатационным режимам его использования. Измеренные значения $c_{\text{NOx}} = 860 \text{ ppm}$ ($8,9 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$) с недостаточным запасом соответствуют требованиям действующим нормам. Указанные факты потребовали дополнительных исследований. В качестве одной из причин неоптимальности процесса сгорания рассмотрена несогласованность формы топливного факела с формой КС.

Проведены расчетно-экспериментальные исследования развития топливного факела, которые показали, что в опытном дизеле на номинальном режиме работы к моменту самовоспламенения в цилиндр подается 100% цикловой подачи топлива и значительная ее часть достигает стенок камеры сгорания, температура которых на серийном двигателе — $270 - 280^\circ \text{C}$. Это ухудшает эффективность горения. Отсутствие значительного повышения $p_{\max}$ можно объяснить увеличением периода задержки самовоспламенения с 10° п.к.в. до 17° п.к.в. , что, в свою очередь, может быть связано с возросшей интенсивностью поступления топлива в цилиндр.

На основе опыта доводки базового двигателя ЧН18/20 для улучшения протекания процесса сгорания в исследуемом дизеле и для увеличения плотности воздушного заряда в КС в ходе расчетных исследований рассмотрены следующие возможности: увеличение ϵ с $13,5$ до $15,5$; смещение $\phi_{\text{оп}}$ с -23° п.к.в. до -15° п.к.в. относительно ВМТ; снижение T_{int} на 18 К ; сокращение периода продувки с 100° п.к.в. до 80° п.к.в. ; увеличение действительной степени сжатия путем изменения

фаз газораспределения. В качестве ограничений в ходе моделирования принималось $p_{\max}$ не выше 11,0 МПа; T_g — не выше 833 К (560 °С).

Основные результаты расчетных исследований представлены на рис. 3. Полученные данные позволили в качестве рационального предложения по доводке опытного дизеля принять вариант модернизации № 3 с $\varepsilon = 15,0$; $\varphi_{\text{он}} = -15,0^\circ$ п.к.в.; $T_{\text{int}} = 314$ К.

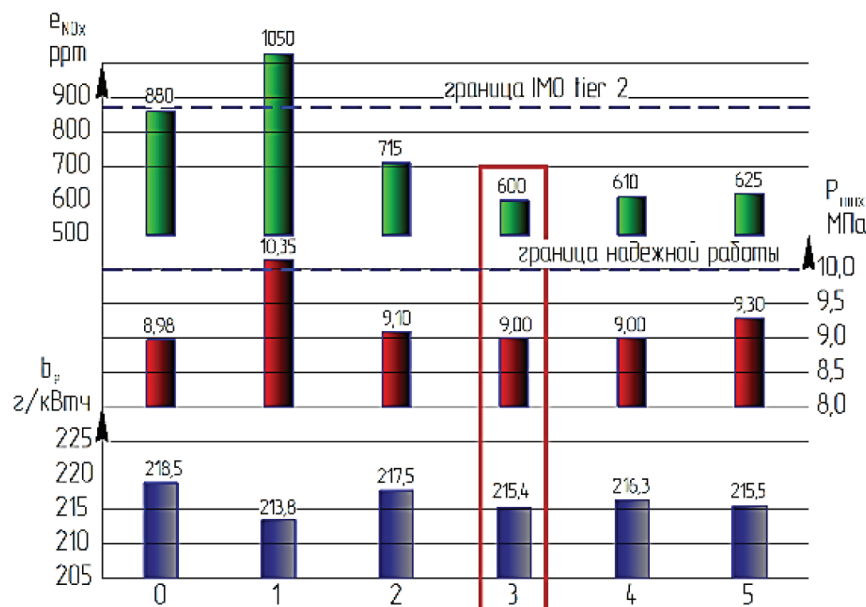


Рис. 3. Изменение исследуемых параметров дизеля в процессе моделирования: 0 — базовый (экспериментальный) дизель; 1 ... 5 — дизель с модернизациями

Обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований

Сравнение экспериментальной и расчетной универсальной характеристики b (рис. 4) показывает, что предложенная модернизация обеспечивает улучшение топливной экономичности на номинальном режиме на 3 г/(кВт·ч) при $c_{NOx} = 600$ ppm (6,2 г/(кВт·ч)). В поле эксплуатационных режимов b уменьшилось на 5 – 10 г/(кВт·ч). Расчеты показывают, что дизель после предлагаемой модернизации будет гарантированно удовлетворять требования IMO tier-2.

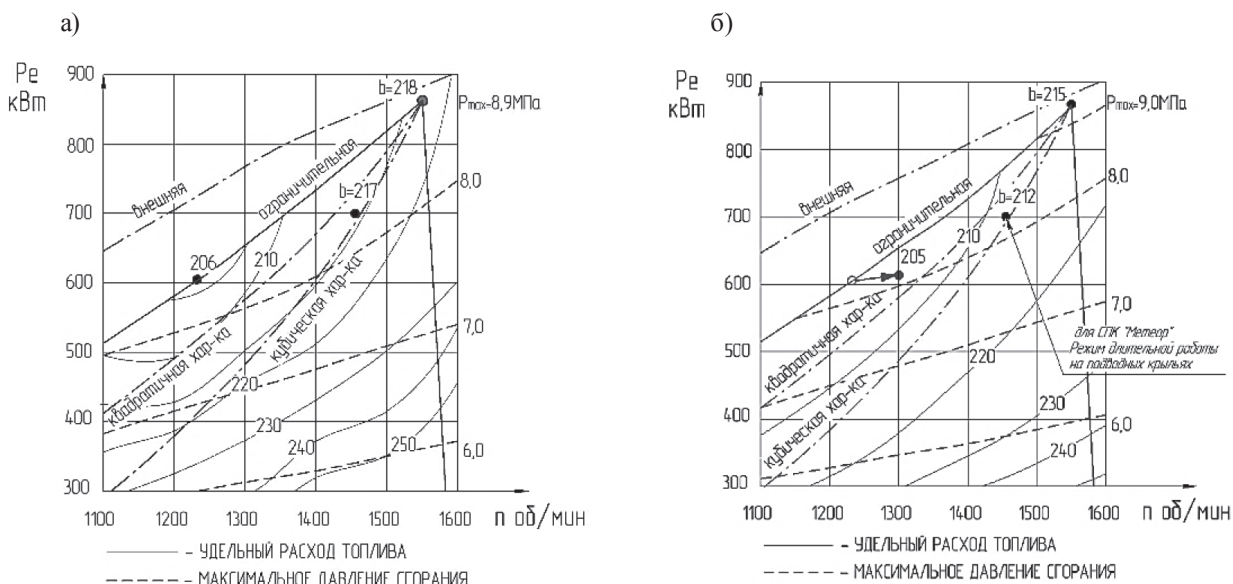


Рис. 4. Универсальная характеристика расхода топлива для существующего дизеля (а) и рассчитанная по результатам предлагаемых модернизаций (б)

В целях дальнейшего совершенствования процесса сгорания топлива в цилиндрах исследуемого дизеля можно рекомендовать уменьшение диаметра соплового отверстия d_{ϕ} с 0,27 до 0,25 ... 0,23 мм, сокращение количества сопловых отверстий с 8 до 6 ... 7, угол в профиле между сопловыми отверстиями θ_1 от 140 до 150° с одновременным использованием всего диапазона изменения давления впрыска согласно характеристикам топливной аппаратуры (от 60 МПа до 160 МПа), что позволит повысить управляемость процесса сгорания.

Выводы

Необходимость применения математического моделирования внутрицилиндровых процессов при проектировании и доводке судовых дизельных двигателей доказана многолетним опытом подобных работ. Математические модели внутрицилиндрового процесса, реализованные в предлагаемых на рынке расчетных программах, с высокой степенью достоверности описывают физико-химические процессы, происходящие в цилиндре и системах дизельного двигателя. Вместе с тем, практическое использование таких моделей при решении некоторых оптимизационных задач (в частности, при улучшении эксплуатационных и экологических показателей судовых дизелей) зачастую нерационально по причине сложности их корректной настройки и высокой стоимости использования. Указанное обстоятельство потребовало от авторов статьи разработки методологии математического описания и управления процессом сгорания в цилиндре дизеля для осуществления исследований по улучшению экологических и эксплуатационных показателей судового дизеля.

В основу методологии положено теоретическое описание процессов тепловыделения в цилиндре судового дизеля, дополненное экспериментальными данными по индицированию рабочего процесса с последующей тщательной настройкой и решением полуэмпирического уравнения профессора Виббе, описывающего процесс сгорания в цилиндре.

Для подтверждения верности предложенной методологии проведена ее расчетно-экспериментальная апробация на судовом высокооборотном дизеле M482 (12ЧН18/20) с аккумуляторной топливной системой. Управляющее воздействие на процесс сгорания осуществлялось при помощи изменения показателей заряда цилиндра в момент впрыска топлива.

Математическое моделирование рабочего процесса при рассматриваемых корректировках обеспечило улучшение топливной экономичности на номинальном режиме на 3 г/(кВт·ч), а в поле эксплуатационных режимов на 5 – 10 г/(кВт·ч), при этом выбросы оксидов азота получены на уровне $c_{\text{NOx}} = 600$ ppm (6,2 г/(кВт·ч)). В качестве рационального предложения по доводке опытного дизеля принят вариант $\varepsilon = 15,0$; $\varphi_{\text{оп}} = -15,0^\circ$ п.к.в.; $T_{\text{инт}} = 314$ К.

Полученный практический опыт исследовательских работ позволяет обоснованно подходить к разработке рекомендации по улучшению эксплуатационных и экологических параметров судового дизельных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: автореф. дис. ... д-р техн. наук / А. С. Кулешов. — М., 2011.
2. Машиностроение. Энциклопедия. — Т. IV–14 / Л. В. Грехов. Двигатели внутреннего сгорания. — М.: Машиностроение, 2013.
3. Щенников И. А. Прогнозирование эксплуатационных показателей дизельной энергетической установки судна на этапе проектирования ее элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. А. Щенников. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015.
4. Мурзин В. С. Эффективность раздельного впрыскивания топлива в камеру сгорания дизеля / В. С. Мурзин, А. П. Маслов, Е. А. Лазарев // Двигателестроение. — 2008. — № 3. — С. 13–16.
5. Иванченко А. А. Систематизация методов управления процессом сгорания и их общая оценка / А. А. Иванченко, С. В. Терентьев, В. Н. Соловьев // Сб. науч. тр. «Судостроение и судоремонт». — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2000. — С. 64–73.

6. Кавтарадзе Р. З. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, А. А. Зеленцов [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2011. — № 4. — С. 83–102.

7. Иванченко А. А. Физические предпосылки и проблемы описания процесса сгорания в дизеле / А. А. Иванченко, А. А. Белов // Водные пути и гидротехнические сооружения: тр. науч.-методич. конф. — Т. 1. Водные пути и гидротехнические сооружения, информационные технологии, портовая техника и электромеханика, судостроение и судоремонт. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2006. — С. 270–282.

8. Матвеев В. В. Численное моделирование рабочего процесса ДВС (дизелей, газовых двигателей и газодизелей): учеб. пособие / В. В. Матвеев, В. Т. Бордуков. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2002. — 173 с.

9. Чесноков С. А. Моделирование внутрицилиндровых процессов в дизелях методом химического турбулентного тепломассообмена / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов, С. А. Потапов, П. В. Михайлов // Двигателестроение. — 2010. — № 1. — С. 3–8.

10. Системы управления дизельными двигателями: пер. с нем. — 1-е изд. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.

11. Иванченко А. А. Выбор математической модели для описания характеристики выгорания топлива при доводке судового дизеля с аккумуляторной топливной системой / А. А. Иванченко, В. А. Макуров, И. А. Щенников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 31–37.

12. Иванченко А. А. Прогнозирование показателей опытного судового дизеля 12ЧН18/20 с аккумуляторной топливной аппаратурой / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // Материалы 4 Всероссийской межотраслевой науч.-техн. конференции, посвященной 125-летию В. А. Ваншейдта, 12 – 13 февраля 2015 г. — СПб.: Изд-во СПбГМУ, 2015. — С. 69–71.

PROBLEMS AND EXPERIENCE OF MATHEMATICAL MODELING NO_x EMISSIONS AND OPERATING CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED DIESEL ENGINE M482

The article considers modern approaches to mathematical modeling of nutriti-lindrovij process, their main advantages and disadvantages. It justifies the use of fundamental of fundamental laws of mixture formation and combustion for solving optimization problems on Mata-automatic modeling of environmental and operational characteristics of marine diesel engines. The indicated theoretical foundations of the processes of heat release in the cylinder of marine diesel engine. Proposed methodology of mathematical description and control of the combustion process in the cylinder based on the use of simplified semi-empirical models and results of experimental work. A calculation-experimental approbation of the proposed approach in the study of working process of ship diesel engine M482 (12 ЧН18/20) with accumulator fuel equipment was performed. Recommendations for further improvement of the working process and characteristics of the fuel equipment of the diesel engine were substantiated. The generalization of the results of calculation and experimental studies of the formation of settlement characteristics of universal consumption was performed. The conclusion about the possibility of further modernization of the investigated diesel engine was made.

Keywords: emission of nitrogen oxides, performance, mathematical modelling of working process of diesel engine.

REFERENCES

1. Kuleshov, A. S. Razvitie metodov rascheta i optimizacija rabochih processov DVS. Abstract of Dr. diss. M., 2011.
2. Grekhov, L V. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Entsiklopediya. Tom IV-14. M.: Mashinostroenie, 2013.
3. Shhennikov, I. A. Prognozirovanie jekspluatacionnyh pokazatelej dizelnoj jenergeticheskoj ustanovki sudna na jetape proektirovanija ee jelementov. Abstract of PhD diss. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
4. Murzin, V. S., A. P. Maslov, and E. A. Lazarev. "Effectiveness of Separate Fuel Injection into the Engine Combustion Chamber." *Dvigatlestroyeniye* 3 (2008): 13–16.

5. vanchenko, A. A., S. V. Terentev, and V. N. Solov'ev. "Sistematizacija metodov upravlenija processom sgoranija i ih obshhaja ocenka." *Sbornik nauchnyh trudov «Sudostroenie i sudoremont»*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2000: 64–73.
6. Kavtaradze, R. Z., D. O. Onishchenko, A. A. Zelentsov, S. M. Kadyrov, and M. M. Aripdzhanov. "Computational and Experimental Study of Influence of Piston's and Sleeve's Thermal Insulation on Formation of Nitrogen Oxides in Combustion Products of High-Speed Diesel." *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 4 (2011): 83–102.
7. Ivanchenko, A. A., and A. A. Belov. "Fizicheskie predposylki i problemy opisanija processa sgoranija v dizele." *Vodnye puti i gidrotehnicheskie sooruzhenija: trudy nauchno-metodicheskoy konferencii. T.1. Vodnye puti i gidrotehnicheskie sooruzhenija, informacionnye tehnologii, portovaja tehnika i jelektromehanika, sudostroenie i sudoremont*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2006: 270–282.
8. Matveev, V. V., and V. T. Bordukov. *Chislennoe modelirovanie rabocheho protsessa DVS (dizeley gazovyh dvigateley i gazodizeley): uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2002.
9. Chesnokov, S. A., N. N. Frolov, S. A. Potapov, and P. V. Mikhailov. "Modelling of In-Cylinder Processes Based on Chemical Turbulent Heat-Mass Exchange." *Dvigatelistroyeniye* 1 (2010): 3–8.
10. *Sistemy upravlenija dizelnymi dvigateljami* / per. s nem. 1 ed. M.: ZAO KZhI «Za rulem», 2004.
11. Ivanchenko, A. A., V. A. Makurov, and I. A. Shhennikov. "Selecting a mathematical model for describing characteristics of the fuel burnup at operational development marine diesel engine with common rail system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 31–37.
12. Ivanchenko, A. A., and I. A. Shhennikov. "Prognozirovanie pokazatelej opytnogo sudovogo dizelja 12ChN18/20 s akkumuljatornoj toplivnoj apparaturoj." *Materialy 4-oj Vserossijskoj mezhotraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii posvjashhennoj 125-letiju V.A. Vanshejdta, 12-13 fevralja 2015g*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015: 69–71.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванченко Александр Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
ivanchenkoaa@gumrf.ru
Щенников Иван Андреевич —
кандидат технических наук, инженер-конструктор.
ПАО «ЗВЕЗДА»
ivanschennikov@yandex.ru
Иванченко Андрей Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Иванченко Александр Андреевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_seu@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanchenko Aleksandr Andreevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
ivanchenkoaa@gumrf.ru
Shchennikov Ivan Andreevich —
PhD, Design Engineer.
Public joint-stock company «ZVEZDA»
ivanschennikov@yandex.ru
Ivanchenko Andrei Aleksandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Ivanchenko Aleksandr Andreevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_seu@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.