

HARMONIZATION OF THE CONSTRUCTIVE AND CONTROLLABLE PARAMETERS OF THE DIESEL ENGINE ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THE PROCESSES IN THE CYLINDER

V. V. Gavrilov¹, V. Y. Mashchenko², V. I. Zakharov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Saint-Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

The quality of the diesel engine largely depends on the consistency constructive and controllable parameters of fuel equipment and combustion chamber. The specified line is provided by this combination of parameters, which are complex processes of flow of fuel into the cylinders, distribution of the sprayed fuel jets and their interaction with the surfaces of the combustion chamber, the process heat from fuel combustion provides excellent fuel economy with acceptable environmental characteristics of the engine. The method of selecting combinations of parameters should be based on adequate description and quantification of the main processes in the engine cylinder with process heat from the combustion. To solve the problem solely according to the calculations is currently not possible. This is because, given the extreme complexity and very high processes, researchers have not yet created an adequate mathematical model. The problem solved by calculation and experiment, combining physical simulation of processes of fuel injection, the movement of the spray of fuel, their interaction with each other, with the surfaces of the combustion chamber and heat dissipation as the result of the analysis of indicator diagrams of diesel. The result of applying this method is the refinement of perception that occurs in the diesel process, in particular the temporal change of the geometrical and mass properties of fuel jets, what are the dates of deposition of fuel on the surface of the piston and the cylinder head, which factors cause changes to the shape of the fuel characteristics during combustion. The application of this methodology gives an opportunity to outline such ways of organizing processes in the cylinder, which provide high economic and environmental performance of the engine during its creation and exploitation.

Keywords: working process of diesel fuel, the movement of the fuel jets, interaction of jets with the surface of the combustion chamber, heat release during combustion.

For citation:

Gavrilov, Vladimir V., Vladimir Yu. Mashchenko, and Viktor I. Zakharov. "Harmonization of the constructive and controllable parameters of the diesel engine on the basis of the analysis of the processes in the cylinder." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1300–1309. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.

УДК 621.436

СОГЛАСОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В. В. Гаврилов¹, В. Ю. Мащенко², В. И. Захаров²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Показатели работы дизельного двигателя существенно зависят от согласованности конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры с формой и размерами камеры сгорания. Указанная согласованность обеспечивается таким сочетанием параметров, при котором комплекс процессов

подачи топлива в цилиндр, развития топливных струй, их взаимодействия с поверхностями камеры сгорания, выделения теплоты при сгорании топлива обеспечивает высокие показатели топливной экономичности при приемлемых экологических показателях двигателя. Методика согласования параметров должна быть основана на адекватном описании и количественных оценках элементарных внутрицилиндровых процессов в сочетании с процессом выделения теплоты от сгорания топлива. Согласование исключительно расчётным путём в настоящее время невозможно. Это объясняется тем, что ввиду чрезвычайной сложности и быстротечности рассматриваемых процессов пока не созданы в должной мере адекватные их математические модели. Решить рассматриваемую задачу можно расчётно-экспериментальным путём, сочетая физическое моделирование процессов подачи топлива, развития топливных струй, их взаимодействия между собой, с поверхностями камеры сгорания и анализ выделения теплоты в дизеле по индикаторным диаграммам. В ходе использования такой методики выполняется уточнение представлений о деталях происходящих в дизеле процессов, в частности, об изменении во времени геометрических и массовых характеристик топливных струй, о моментах времени нанесения топлива на поверхности поршня, крышки и втулки цилиндра, о причинах изменения формы характеристики выделения теплоты при сгорании топлива. В результате использования такой методики получена возможность целенаправленного воздействия на внутрицилиндровые процессы, обеспечивающего высокие экономические и экологические показатели двигателя при его создании и в ходе эксплуатации.

Ключевые слова: рабочий процесс дизеля, развитие топливной струи, взаимодействие струи с поверхностью, выделение теплоты при горении.

Для цитирования:

Гаврилов В. В. Согласование конструктивных и регулировочных параметров дизеля на основе анализа внутрицилиндровых процессов / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, В. И. Захаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1300–1309. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.

Введение

Современные поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) должны обладать широким набором технико-экономических и экологических показателей. В зависимости от назначения и условий работы конкретного двигателя или его модификации те или иные показатели считаются приоритетными. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо определить соответствующее сочетание конструктивных и регулировочных параметров, обеспечивающее заданные, актуальные для данного случая свойства двигателя. Известно, что показатели двигателя в значительной мере определяются совершенством внутрицилиндровых процессов — процессов смесеобразования и сгорания топлива. В свою очередь, качество этих процессов существенно зависит от характера протекания и параметров процессов подачи топлива в цилиндр двигателя, процесса распыливания топлива, развития топливных струй, их взаимодействия с поверхностями камеры сгорания (КС), самовоспламенения и горения топлива. Это означает, что указанное сочетание невозможно задать изначально при создании некоторого типоразмера двигателя для всех его модификаций, согласование параметров при необходимости следует возобновлять.

Указанные процессы нестационарны, крайне быстротечны, происходят в условиях многофазности, температурной и концентрационной неоднородности рабочего тела. Поэтому они весьма трудно поддаются изучению и адекватному описанию. В настоящее время при решении практических задач все более широкое применение находит математическое моделирование происходящих в двигателе сложных процессов. В частности, применяются средства численного моделирования газодинамических, химических, тепловых и других процессов Computational Fluid Dynamics (CFD) [1] – [4]. Подобное моделирование в некоторой степени является средством уменьшения затрат труда и времени при проектировании и доводке двигателей. Однако верификация результатов его использования, как правило, производится по конечным (итоговым) характеристикам комплекса процессов, например, по индикаторным диаграммам рабочего процесса дизеля или по получаемым обработкой этих диаграмм характеристикам выделения теплоты при сгорании топлива. Заметим, что при этом используют в основном интегральные оценки указанных диаграмм и характеристик. Для получения правдоподобных результатов моделирования приходится выполнять большую работу по идентификации параметров (как правило, большого их числа) математической

модели. Проблема состоит в том, что в распоряжении создателей двигателя отсутствует необходимый набор объективных данных об элементарных составляющих комплекса внутрицилиндровых процессов, а также о промежуточных стадиях указанного комплекса. В частности, отсутствуют необходимые сведения о локальных процессах взаимодействия топливных струй с поверхностями КС.

Качество описываемого комплекса процессов зависит от степени согласованности конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры (ТА) двигателя и его КС [5]. Ввиду того, что речь идет о регулировочных параметрах, их согласование с формой и размерами КС необходимо осуществлять не только при создании двигателя, но и в ходе его эксплуатации. Возникающее в ходе эксплуатации нарушение согласованности параметров и его причины должны быть обнаружены с помощью системы диагностирования [6].

Цель настоящего исследования состоит в разработке усовершенствованной методики согласования параметров топливной аппаратуры и КС дизельного двигателя (на основе учета локального взаимодействия топливных струй с поверхностями КС и характеристик выделения теплоты при сгорании топлива), обеспечивающей высокие экономические и экологические показатели двигателя.

Методы и материалы

Исследователями в области поршневых ДВС создан богатый задел в изучении отдельных составляющих комплекса внутрицилиндровых процессов. Важные результаты получены в исследованиях процесса распыливания топлива дизельными форсунками [7] – [9], развития топливных струй [10], испарения топлива [11], воспламенения и горения [12], [13], взаимодействия с элементами КС [14]. Однако выбор параметров элементов ТА и профиля КС, а также диагностирование технического состояния двигателя, как правило, осуществляются без комплексного учета характеристик элементарных процессов [15], [16].

Весьма важно организовать высокоэффективный рабочий процесс при создании судового дизеля и поддерживать его качество в ходе эксплуатации. В свою очередь, параметры и показатели рабочего процесса зависят от конструктивных и регулировочных параметров ТА, формы и размеров КС [5], а также от технического состояния ТА и цилиндропоршневой группы деталей дизеля. Можно выделить большое число указанных конструктивных и регулировочных параметров, влияющих на качество рабочего процесса [6]. Это означает, что при организации и текущем контроле этого качества требуется применение большого числа измерений. Чрезвычайно важным вопросом при выполнении указанной работы является установление связи между совокупностью измерений и характеристиками рабочего процесса. На наш взгляд, в настоящее время эти связи исследованы и описаны недостаточно. Поэтому, как правило, специалисты решают диагностические задачи частного характера с использованием локальных диагностических систем [17].

Авторами статьи изучены известные методы и средства контроля работы элементов дизеля, в частности, методы, основанные на результатах осциллографирования процесса топливоподачи и индицирования внутрицилиндровых процессов [18]. Анализ показал, что практически каждый из исследованных методов может позволить выявить лишь весьма ограниченное число факторов, влияющих на согласованность параметров топливоподачи с КС при создании двигателя, и выявить соответствующие его неисправности в эксплуатации. Очевидно, что известные методы не могут обеспечить достаточный уровень достоверности результатов диагностирования двигателя, так как при их использовании учитывается лишь ограниченный набор параметров рабочего процесса и в методиках, как правило, отсутствует учёт физической сущности связи между процессами, происходящими в ТА и рабочем цилиндре двигателя.

В порядке развития рассмотренных исследований необходимо сформулировать общий принцип усовершенствованной методики согласования конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и КС дизельного двигателя при его создании, а также учёта указанной согласованности при эксплуатации двигателя. Методика должна быть построена на основе

учёта связи между характеристиками комплекса процессов топливоподачи и смесеобразования, с одной стороны, и характеристиками сгорания топлива, с другой. Весьма важную роль в решении этой задачи может играть использование предложенной авторами ранее методики анализа индикаторных диаграмм на тепловыделение при сгорании топлива [18].

Суть предлагаемой методики состоит в одновременной регистрации необходимого набора параметров топливоподачи, а также индикаторной диаграммы при расчёте параметров движения топливных струй в условиях КС, в построении характеристик тепловыделения от сгорания топлива и последующем анализе комплекса указанных данных посредством диагностической модели. Таким образом, предлагаемая методика носит расчётно-экспериментальный характер. Для реализации методики и получения необходимых расчётных зависимостей следует располагать экспериментальными данными о процессах развития топливных струй в КС и их взаимодействия с поверхностями КС.

Результаты

Результаты описания и количественных оценок процессов развития топливных струй в КС и их взаимодействия с поверхностями КС получены посредством физического моделирования указанных процессов [5]. При этом использованы комплекс средств, включающих высокоскоростную киносъёмку, специально созданный ячеистый стробоскоп в сочетании со специальным датчиком силы [19], а также средства иконоки [20], представляющие собой современные средства распознавания и цифровой обработки изображений, в частности, кинограмм.

Фрагменты «обрисовки» контуров топливной струи (в двух её проекциях) для некоторых фаз её развития и взаимодействия с поверхностями модели КС показаны на рис. 1. При моделировании воспроизведены условия развития топливной струи, соответствующие дизелю типа ЧН30/38 (модификация 37ДГ-800).

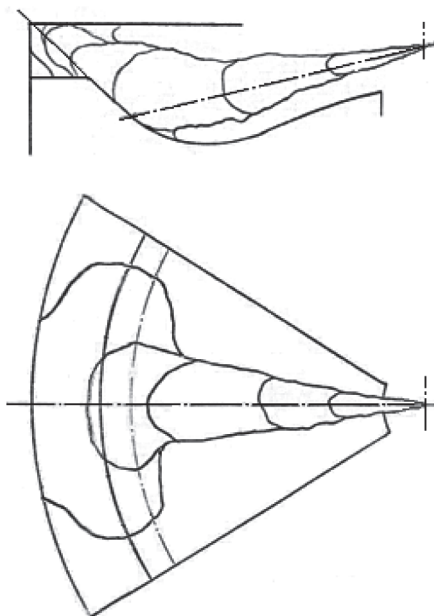


Рис. 1. Взаимодействие топливной струи с поверхностями модели КС двигателя

Представленные здесь, а также другие аналогичные результаты моделирования позволили внести уточнения в соответствующую математическую модель комплекса процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания в дизеле [5], [21]. Однако данная модель весьма громоздка и по этой причине её трудно использовать, например, в процессе эксплуатации двигателя при решении задач диагностирования. Поэтому для достижения поставленной в настоящей работе цели можно использовать простую математическую модель развития топливных струй и их взаимодей-

ствия с поверхностями КС, которая представляет собой набор эмпирических уравнений. Эмпирическая формула дальности l_c , мм, топливной струи имеет вид

$$l_c = 230 p_{j\max}^{0,15} d_c^{0,546} \rho_a^{(0,092 \lg \tau - 0,409)} \tau^{0,375}, \quad (1)$$

где $p_{j\max}$ — максимальное давление впрыскивания топлива, МПа; d_c — диаметр сопловых отверстий, мм; ρ_a — средняя плотность воздушного заряда цилиндра в период подачи топлива, кг/м³; τ — время, мс.

Параметры взаимодействия топливных струй с поверхностью показаны на рис. 2. В результате взаимодействия образуются пристенные потоки («топливные пятна»), относительный радиус которых зависит в основном от диаметра соплового отверстия d_c и расстояния между соплом и стенкой $l_{\text{КС}}$. Радиус топливного пятна b при $\beta = 90^\circ$ имеет следующую зависимость:

$$\frac{b}{l_c} = 0,56 \left(1 - \frac{l_{\text{КС}}}{l_c}\right)^{(-0,25 + 2,0d_c - 0,0022l_{\text{КС}})}, \quad (2)$$

где $l_{\text{КС}} / l_c \leq 1,0$.

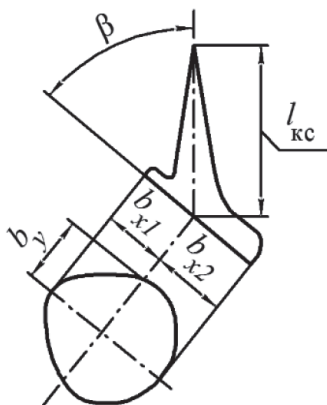


Рис. 2. Параметры взаимодействия топливной струи с плоской преградой

Другие зависимости параметров взаимодействия струи с плоской поверхностью выглядят следующим образом:

$$b_{x1} / b_{x2} = 1 - (0,5 - 0,0053\rho_a)(1 + \cos(1,2\beta - 18)); \quad (3)$$

$$(b_{x1} / b_{x2}) / 2b = 0,94 + 0,06 \cos 4(1,12\beta - 11,2); \quad (4)$$

$$b_y / b = 0,7 + 0,3 \sin(1,29\beta - 25,7), \quad (5)$$

где $30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

С использованием формул (1) – (5) могут быть построены кривые, характеризующие взаимодействие топливной струи со стенками КС, определены моменты времени начала взаимодействия топливной струи с поверхностями КС.

Наряду с рассмотренными геометрическими параметрами необходимо исследовать и описать массовые параметры, а именно распределение массы топлива в различных зонах КС, включая зону взаимодействия соседних струй. Материалом для этого служат данные, приведенные на рис. 3. Эти данные получены упомянутыми выше средствами физического моделирования и относятся к заключительной фазе подачи топлива в дизеле типа ЧН30/38.

На рис. 3, а показана полученная методом высокоскоростной киносъемки покадровая обрисовка контура струй, а на рис. 3, б — полученное методом иконки распределение относительной плотности струй в некоторый момент времени их развития. Важно отметить, что характер распределения масс топлива в развивающейся струе, зарегистрированный методом иконки [20], аналогичен характеру, полученному с использованием специального ячеистого стробо-

скопа [19]. Заметим, что один и тот же результат, зафиксированный двумя независимыми методами, может свидетельствовать о его достоверности.

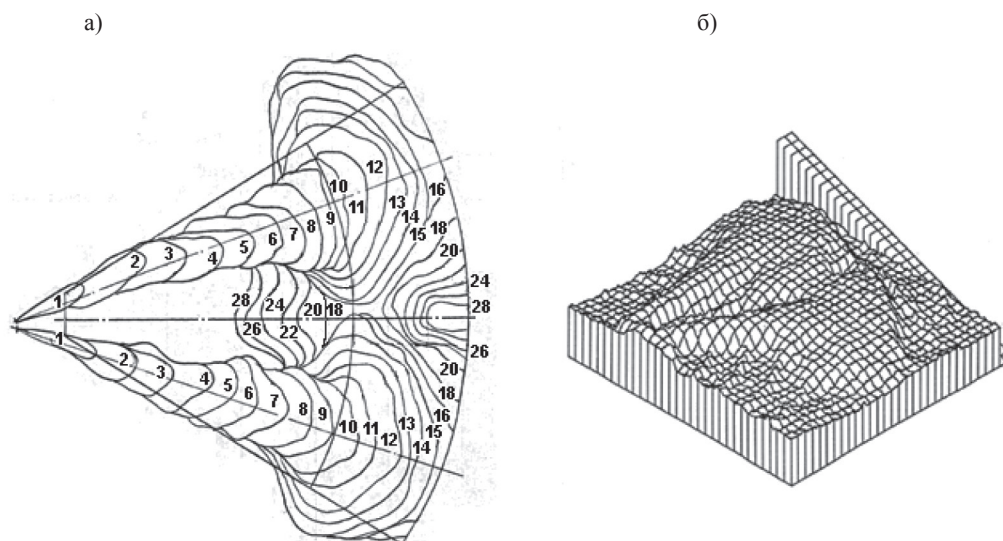


Рис. 3. Взаимодействие топливных струй со стенками КС и между собой:

а — покадровая обрисовка контура струй (вид в плане);

б — распределение масс топлива в струях (аксонометрическое изображение)

Пример использования геометрических параметров взаимодействия топливных струй с поверхностями КС при доводке рабочего процесса двигателя в ходе его создания, а также при диагностировании в ходе эксплуатации приведен на рис. 4, на котором отображен комплекс диагностических параметров.

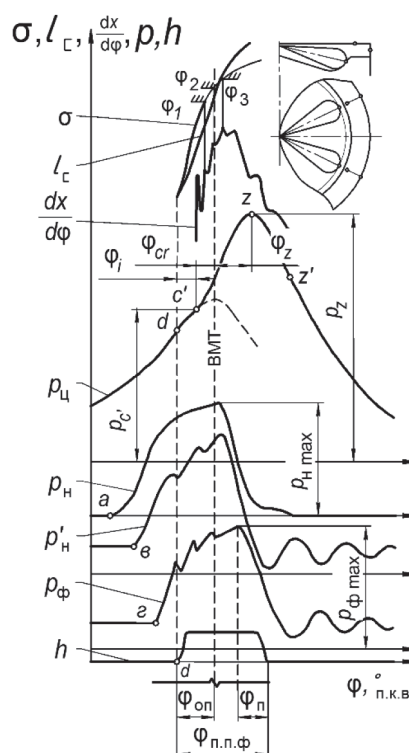


Рис. 4. Комплекс диагностических параметров: σ — доля поданного топлива;

l_c — дальность топливной струи; $dx/d\varphi$ — относительная скорость выделения теплоты;

p_c — давление газов в цилиндре дизеля; p_n — давление топлива в насосе;

p'_n — давление топлива в штуцере насоса; p_ϕ — давление топлива в форсунке; h — подъем иглы форсунки

Так, на рис. 4 представлены характеристики процесса топливоподачи, движения топливных струй в КС дизеля и выделения теплоты от сгорания топлива.

Обсуждение

В результате взаимодействия топливных струй со стенками КС имеют место характерные «возмущения» на кривой $dx/d\varphi$ относительной скорости выделения теплоты (см. рис. 4). На рисунке отмечены изломы характеристики $dx/d\varphi$, соответствующие моментам времени начала взаимодействия топливной струи последовательно с поверхностью поршня, с крышкой цилиндра и со втулкой цилиндра (соответственно точки $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) [22]. Излом характеристики $dx/d\varphi$ вызван снижением интенсивности горения из-за вступления топливных струй в контакт с менее нагретой поверхностью КС. Указанные моменты также отмечены на так называемой *кривой дальнобойности топливной струи* l_c . Смещение рассматриваемых характерных моментов относительно «эталонного» положения свидетельствует о нарушении согласованности параметров ТА и КС, которое может быть вызвано нарушением регулировок или изменением технического состояния элементов ТА и цилиндропоршневой группы деталей двигателя.

Анализ результатов серии экспериментов, в которых получены данные о распределении массы топлива в соседних струях, взаимодействующих в процессе контакта с поверхностями КС (см. рис. 3, б), показывает, что в двигателях исследованного класса (среднеоборотных, с объёмным смесеобразованием, диаметром цилиндра в диапазоне 230 – 300 мм, при среднем уровне форсировки рабочего процесса, соответствующем дизелю типа ЧН30/38) при наилучшем сочетании параметров ТА и конфигурации КС массовая доля топлива, содержащегося в зоне смешения струй в момент окончания подачи топлива, составляет $\bar{m}_{f_{cm}} = 7 \dots 12 \%$. При этом, как правило, обеспечивается наилучшая топливная экономичность дизеля при его приемлемых экологических показателях. В исследованных вариантах комплектации ТА и КС отклонение $\bar{m}_{f_{cm}}$ от указанного диапазона влечет за собой ухудшение показателей работы дизеля. Ухудшение в ряде случаев было связано либо с чрезмерным попаданием топлива на втулку цилиндра, либо с несвоевременным использованием воздуха для горения в периферийных зонах КС, либо с недостаточным расстоянием между соплом и КС, ограничивающим свободное развитие топливной струи, что неблагоприятно сказывается на интенсивности перемешивания топлива с воздухом.

Заключение

Высокие экономические и экологические показатели дизеля при его создании и эксплуатации могут быть обеспечены посредством согласования конструктивных и регулировочных параметров. Весьма существенную роль в обеспечении высоких показателей играет согласованность конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и КС двигателя. Решить задачу согласования можно расчётно-экспериментальным путём, сочетая физическое моделирование процессов подачи топлива, развития топливных струй, их взаимодействия между собой, с поверхностями КС и анализ выделения теплоты в дизеле по индикаторным диаграммам. Такой подход, отличающийся, с одной стороны, комплексностью, а с другой, — «локальностью» описания отдельных процессов, позволяет выявить влияние существенных факторов на итоговые характеристики рабочего процесса дизеля, уточнить представление о деталях сложных внутрицилиндровых процессов. В частности, могут быть выявлены обстоятельства и роль нанесения топлива на поверхности КС, сформулированы принципы, которыми следует руководствоваться при профилировании КС с учётом характеристик процесса подачи топлива.

Предлагаемый подход к исследованию комплекса процессов в дизельном двигателе и разработанная методика согласованного выбора основных параметров двигателя и анализа указанной согласованности в ходе эксплуатации позволяют:

- расширить представление о происходящих в КС процессах;
- уточнить влияние тех или иных факторов на рабочий процесс дизеля и принять меры к его совершенствованию;

– разработать усовершенствованную диагностическую модель, которая даст возможность существенно увеличить число диагностических параметров и с повышенной достоверностью выявить и локализовать неисправность дизеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chung T. J.* Computational Fluid Dynamics / T. J. Chung. — Second edition. — Cambridge University Press, 2010. — 1058 p.
2. 3D-CFD моделирование сгорания и теплообмена в быстроходном дизеле [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.aps-c.ru/publications/Heat_transfer_HSDI.pdf (дата обращения: 08.11.2017).
3. *Baumgarten C.* Mixture Formation in Internal Combustion Engines / C. Baumgarten. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. — 294 p.
4. *Weinhold I.* The Three Waves of Commercial CFD // Engineering edge. — 2015. — Vol. 4. — Is. 1 [Электронный ресурс] / I. Weinhold, J. Parry. — Режим доступа: <https://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/> (дата обращения: 08.11.2017).
5. *Гаврилов В. В.* Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2004. — 359 с.
6. *Гаврилов В. В.* Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
7. *Гаврилов В. В.* Моделирование процесса распыливания топлива в судовом дизеле / В. В. Гаврилов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 91–96.
8. *Saha K.* Assessment of Cavitation Models for Flows in Diesel Injectors With Single-and Two-Fluid Approaches / K Saha, X. Li // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2016. — Vol. 138. — Is. 1. — Pp. 011504. DOI: 10.1115/1.4031224.
9. *Скоморовский С. А.* Вихревая турбулентность и кавитация в сопловом канале дизельной форсунки / С. А. Скоморовский, В. В. Гаврилов, Н. В. Семидетнов, М. Н. Голованов // Сб. науч. тр. по материалам Междунар. конф. «Двигатели-2007». — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — С. 269–274.
10. *Рудаков В. А.* Исследование развития топливных струй в камерах сгорания дизелей / В. А. Рудаков, А. Н. Карелин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2012. — № 4. — С. 30–42.
11. *Кайкацишвили Г. З.* Моделирование процесса испарения капли топлива в камере сгорания дизеля / Г. З. Кайкацишвили // Наука в центральной России. — 2013. — № 4. — С. 54–63.
12. *Сеначин П. К.* Задержка воспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи повышенного давления / П. К. Сеначин, А. П. Сеначин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 1-2. — С. 479–486.
13. *Лазарев Е. А.* Физические концепции и математические модели процесса сгорания топлива в дизеле / Е. А. Лазарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2010. — № 10 (186). — С. 32–39.
14. *Кухаренок Г. М.* Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // Наука и техника. — 2011. — № 4. — С. 35–39.
15. *Магафуров Р. Ж.* Методы диагностирования топливной аппаратуры дизелей / Р. Ж. Магафуров // NovaInfo.ru. — 2016. — Т. 4. — № 47. — С. 40–45.
16. Диагностика дизельной топливной аппаратуры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cnt-moscow.ru/ru/age/newpage/> (дата обращения: 07.11.2017).
17. *Никитин Е. А.* Диагностирование дизелей / Е. А. Никитин, Л. В. Станиславский, Э. А. Улановский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
18. *Гаврилов В. В.* Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.

19. Gavrilov V. V. Experimental studies of local processes as a basis of the diesel indices improvement methods / V. V. Gavrilov // Тяжелое машиностроение. — 2003. — № 11. — С. 18–20.
20. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Герман. — М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
21. Мащенко В. Ю. Повышение эффективности рабочих процессов в судовом дизеле согласованным выбором параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания: дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О Макарова, 2013. — 209 с.
22. Абрамчук Ф. И. Процессы в перспективных дизелях: сб. ст. / Ф. И. Абрамчук и [др.]; под ред. А. Ф. Шеховцова. — Харьков: Изд-во «Основа», 1992. — 352 с.

REFERENCES

1. Chung, T.J. *Computational Fluid Dynamics*. Second edition. Cambridge University Press, 2010.
2. 3D-CFD modelirovanie sgoraniya i teploobmena v bystrokhodnom dizele. Web. 8 Nov. 2017 <http://www.aps-c.ru/publications/Heat_transfer_HSDI.pdf>.
3. Baumgarten, C. *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
4. Weinhold, I., and J. Parry. “The Three Waves of Commercial CFD.” *Engineering edge* 4.1 (2015). Web. 8 Nov. 2017 <<https://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/>>.
5. Gavrilov, V.V. Metody povysheniya kachestva smeseobrazovaniya i sgoraniya v sudovom dizele na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya lokal'nykh vnutrisilindrovnykh protsessov. Dr. diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2004.
6. Gavrilov, Vladimir Vasilyevich, and Vladimir Yurievich Mashchenko. “Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
7. Gavrilov, V.V. “Model operation of process of disintegration of fuel in a marine diesel.” *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2009): 91–96.
8. Saha, Kaushik, and Xianguo Li. “Assessment of Cavitation Models for Flows in Diesel Injectors With Single-and Two-Fluid Approaches.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 138.1 (2016): 011504. DOI: 10.1115/1.4031224.
9. Skomorovskii, S.A., V.V. Gavrilov, N.V. Semidetnov, and M.N. Golovanov. “Vikhrevaya turbulentnost' i kavitatsiya v soplovom kanale dizel'noi forsunki.” *Sb. nauchn. trudov po materialam Mezhdunarod. konf. «Dvigateli-2007»*. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2007: 269–274.
10. Rudakov, V.Yu., and A.N. Karelin. “Study of fuel jet evolution in diesel combustion chambers.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 4 (2012): 30–42.
11. Kaikatsishvili, G.Z. “The process modeling of fuel's drop evaporation in combustion chamber of diesel.” *Nauka v tsentral'noi Rossii* 4 (2013): 54–63.
12. Senachin, P.K., and A.P. Senachin. “Delay of fuel ignition in diesel engine with high pressure fuel supply system.” *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 13.1-2 (2011): 479–486.
13. Lazarev, Evgeniy A. “Physical concertion and mathematical models of the fuel combustion process in the diesel engine.” *Bulletin of SUSU, Series “Mechanical engineering industry”* 10(186) (2010): 32–39.
14. Kukharonak, G.M., and D.G. Hershan. “Modeling of Fuel Spray Characteristics and Diesel Combustion Chamber Parameters.” *Science and Technique* 4 (2011): 35–39.
15. Magafurov, R.Zh. “Metody diagnostirovaniya toplivnoi apparatury dizelei.” *NovaInfo.Ru* 4.47 (2016): 40–45.
16. Diagnostika dizel'noi toplivnoi apparatury. Web. 7 Nov. 2017 <<http://www.cnt-moscow.ru/ru/abc/newpage/>>.
17. Nikitin, E.A., L.V. Stanislavskii, E.A. Ulanovskii, et al. *Diagnostirovanie dizelei*. M.: Mashinostroenie, 1987.
18. Gavrilov, Vladimir Vasilyevich, and Vladimir Yurievich Mashchenko. “Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
19. Gavrilov, V.V. “Experimental studies of local processes as a basis of the diesel indices improvement methods.” *Tyazheloe mashinostroenie* 11 (2003): 18–20.

20. Potapov, A.A., Yu.V. Gulyaev, S.A. Nikitov, A.A. Pakhomov, and V.A. German. *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii*. M.: FIZMATLIT, 2008.

21. Mashchenko, V.Yu. *Povyshenie effektivnosti rabochikh protsessov v sudovom dizele so-glasovannym vyborom parametrov toplivnoi apparatury i kamery sgoraniya*. PhD diss. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.

22. Abramchuk, F.I., et al. *Protsessy v perspektivnykh dizelyakh: sb. st.* Edited by A.F. Shekhovtsova. Khar'kov: Izd-vo «Osnova», 1992.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru

Машенко Владимир Юрьевич —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

190121, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Захаров Виктор Игоревич — инженер

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

190121, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: viktor__zaharov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gavrilov, Vladimir V. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,

198035, Russian Federation

e-mail: gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru

Mashchenko, Vladimir Yu. —

PhD

Saint-Petersburg State Marine

Technical University

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,

190121, Russian Federation

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Zakharov, Viktor I. — Engineer

Saint-Petersburg State Marine

Technical University

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,

190121, Russian Federation

e-mail: viktor__zaharov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

Received: November 10, 2017.