

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

OPERATION OF SHIP POWER EQUIPMENT

УДК 621.43.05

DOI: 10.37890/jwt.v68.206

Механизмы управления рабочим процессом дизельного двигателя

С.Е. Андрусенко¹

О.Е. Андрусенко²

В.В. Колыванов³

Ю.И. Матвеев³

¹*РУМО, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Российский морской регистр судоходства, г. Варна, Болгария*

³*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье рассматривается вопрос снижения удельного расхода топлива и улучшение экологических показателей двигателей внутреннего сгорания путем изменения рабочего процесса для получения качественного и своевременного выделения теплоты в результате сгорания топлива. Целью управления рабочим процессом является создание благоприятных условий для воспламенения топлива. Рассмотрены пути возникновения очагов воспламенения в камере сгорания. Выделены основные периоды подачи топлива, продолжительность воспламенения в зависимости от времени запаздывания, процесс сгорания, влияние угла опережения подачи топлива на экологические параметры двигателя. Обоснована возможность управления рабочим процессом в период подготовки начала горения и приведены примеры механизмов отечественных и зарубежных аналогов, обеспечивающих управление рабочим процессом. Вывод – высокие показатели управления рабочим процессом обеспечивает система электронного управления – common rail, несмотря на широкое распространение механических методов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, процесс сгорания, процесс воспламенения, топливный насос высокого давления, рабочий процесс двигателя, удельный расход топлива, электронная система впрыска, common rail.

Work process control mechanisms of diesel engine

Sergey E. Andrusenko¹

Oleg E. Andrusenko²

Vladimir V. Kolyvanov³

¹*Department JSC «RUMO», N. Novgorod, Russia*

²*Russian Maritime Register of shipping, Varna, Bulgaria*

³*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract The article discusses the issue of reducing the specific fuel consumption and improving the internal combustion engines environmental performance by changing the working process to obtain high-quality and timely heat release as a result of fuel combustion. The workflow control purpose is to create favorable conditions for fuel ignition. The ways of ignition centers occurrence in the combustion chamber are considered. The fuel supply

main periods, the ignition duration depending on the lag time, the combustion process, the influence of the fuel supply advance angle on the engine environmental parameters are considered. The possibility of controlling the working process during the preparation of the combustion beginning is substantiated and examples of domestic mechanisms and foreign analogs that provide the working process control are given. Conclusion - the workflow high performance management is provided by the electronic control system - common rail, despite the mechanical methods widespread use.

Keywords: internal combustion engine, combustion process, ignition process, fuel pump, engine workflow, specific fuel consumption, electronic injection system, common rail.

Введение

В настоящее время доля выработки энергии двигателями внутреннего сгорания (ДВС), работающими на ископаемом топливе, составляет 25% мирового энергетического баланса [1]. Поэтому проблема снижения удельного расхода топлива и улучшения экологических показателей двигателей является актуальной.

Одним из основных механизмов влияния на показатели работы двигателей является рабочий процесс.

Большое количество публикаций посвящено влиянию различных параметров, таких как топливоподача, наполнение и качество смесеобразования в цилиндре на рабочий процесс двигателя [2-7]. Этой же тематике посвящены классические работы отечественных и зарубежных авторов [8-10].

Основной целью организации рабочего процесса является полное и своевременное выделение тепла в результате сгорания, т.е. получение необходимых скоростей реакции окисления углеводородов топлива [11].

Методы и результаты

Физико-химические преобразования горючей смеси в цилиндре быстроходного дизеля представляют собой единый непрерывный процесс. Эксперименты показывают, что этот сложный процесс можно разделить на периоды. Это позволяет установить общую картину управления процессом и определить практические средства для воздействия на протекание рабочего процесса [11].

Анализ кривых, приведенных на рисунке 1, позволил сделать вывод о том, что в процессе преобразования топлива в цилиндре двигателя наблюдаются четыре периода: подготовительный τ_1 , воспламенения и начального горения τ_2 , основного горения τ_3 и замедленного горения τ_4 [11].

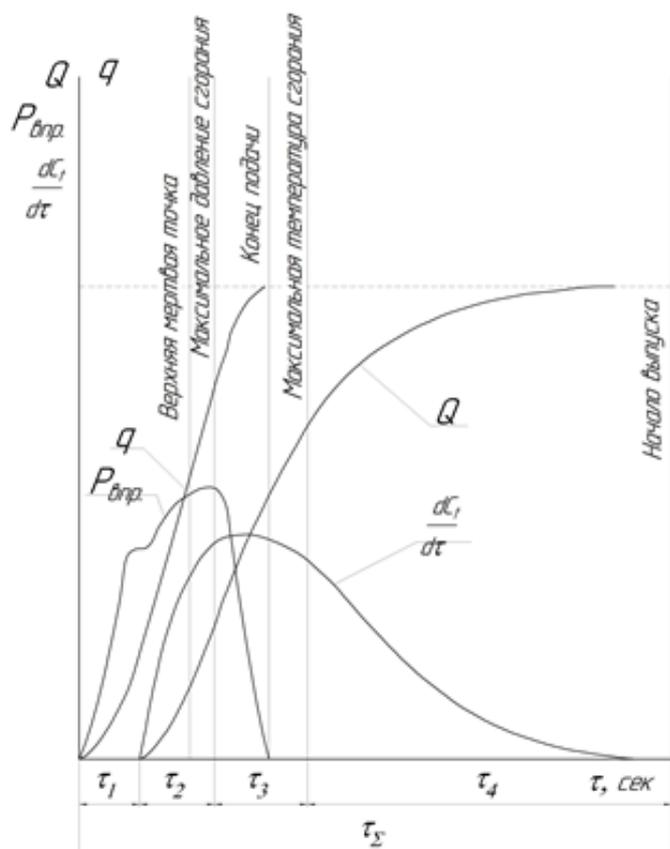


Рис. 1 – Изменение суммарной скорости горения, относительного выделения тепла, давления впрыска и относительной подачи топлива в быстроходном дизеле с наддувом при работе на номинальном режиме.

Fig. 1 –Changes in the total combustion rate, relative heat release, injection pressure and relative fuel supply in a fast-supercharged diesel engine when operating at nominal mode.

Общие и основные признаки, по которым различаются эти периоды, заключаются:

В скорости выделения тепла при горении топлива в зависимости от перемещения поршня;

В характере изменения и величине исходной концентрации топлива [11].

Первый, подготовительный период сгорания (период задержки самовоспламенения) длится от начала подачи топлива в цилиндр до момента отрыва линии сгорания на индикаторной диаграмме от линии сжатия, и является главным периодом, определяющим экономические и экологические показатели работы двигателя [11].

Характерные особенности первого периода заключаются в следующем:

скорости реакции в этот период малы, могут быть приняты равными нулю;

– топливо непрерывно поступает в цилиндр с возрастающей скоростью;

– изменение давления и температуры вследствие начавшихся физико-химических процессов мало, увеличение давления и температуры в цилиндре практически целиком определяется ходом сжатия [11].

В течение первого периода топливо, поступающее в цилиндр двигателя, проходит стадию физико-химической подготовки к воспламенению, заключающуюся в нагреве,

испарении и химических реакциях, связанных с появлением активных центров. Эти процессы происходят при большом избытке воздуха и малых концентрациях топлива.

Результатом такой подготовки является возникновение многочисленных очагов воспламенения, распространённых по объёму камеры сгорания, в которых реакция завершается цепочно-тепловым взрывом и образованием пламени.

В зависимости от продолжительности первого периода, зависящего от времени запаздывания воспламенения, меняется количество топлива, накапливающегося к моменту воспламенения и степень неравномерности распределения топлива по объёму камеры сгорания.

Целью управления рабочим процессом является создание таких условий воспламенения топлива, чтобы максимум давления не приходился на момент движения поршня к ВМТ и не заходил далеко за ВМТ.

Воздействовать на качественные показатели подготовительного периода можно различными способами:

- рычажный (MaK) индивидуальный или с общим эксцентриком;
- поворотный (MAN) – связан с конструкцией двигателя, т.к. требуется отделить газовые и топливные кулачки;
- за счет изменения высоты толкателя топливного насоса высокого давления (ТНВД);
- применение муфты автоматического регулирования угла опережения впрыска топлива [12];
- конструктивная доработка отсечной кромки плунжера [13];
- common rail – аккумуляторная система;
- электронный со следящей системой режима работы двигателя;
- двухфазная и ступенчатая подача топлива, улучшающая рабочий процесс и экономичность дизеля [14].

Рычажный механизм (рис. 2) состоит из рычага, посаженного на эксцентриковый вал [15]. Меняя положение эксцентрика, можно влиять на начало подачи топлива и на своевременность его воспламенения в цилиндре двигателя. Как видно из приведенного графика, с увеличением угла начала подачи топлива (положение I эксцентрика рычага) до ВМТ (точка 0 на графике) максимальное давление сгорания уменьшается. Эксцентриковый вал может устанавливаться вручную на стадии регулировки двигателя или меняться в зависимости от режима работы двигателя. Такие устройства применялись и еще применяются чаще всего на двигателях фирм MaK, SEMT-Pielstic, Caterpillar.

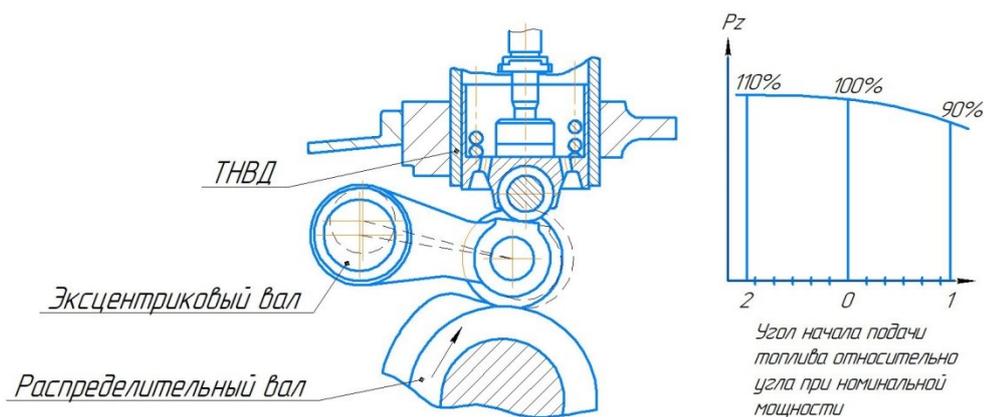


Рис. 2 – Рычажный механизм регулировки начала подачи топлива.

Fig. 2 – Lever mechanism for adjusting the start of fuel delivery.

Поворотный механизм регулирования начала впрыска топлива предполагает наличие в конструкции двигателя двух распределительных валов – газового и топливного. Топливный вал может поворачиваться винтовой зубчатой передачей, предусмотренной на валу и в ступице зубчатого колеса распределительного вала (рис. 3).

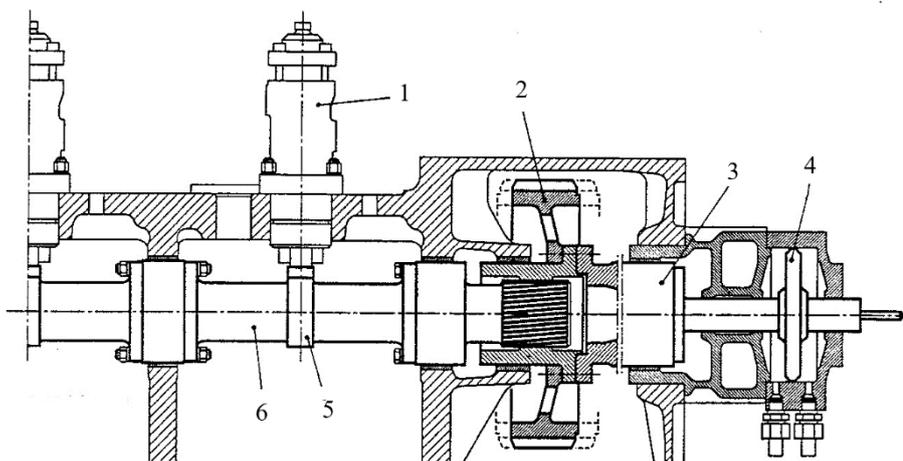


Рис. 3 – Механизм регулирования угла начала подачи топлива: 1 – топливный насос высокого давления; 2 – приводная шестерня; 3 – подшипник; 4 – гидравлический привод; 5 – топливный кулачок; 6 – распределительный вал.

Fig. 3 – Mechanism for adjusting the angle of the beginning of the fuel supply: 1 – high pressure fuel pump; 2 – drive gear; 3 – bearing; 4 – hydraulic drive; 5 – fuel cam; 6 – a camshaft.

Поворот топливного распределительного вала происходит при работающем двигателе в сторону «раньше» или «позже», в зависимости от того, что нужно обеспечить при работе двигателя – экономичность работы по удельному расходу топлива или получить более экологический режим работы двигателя. Как известно, проблема одновременного получения экономичного и экологичного двигателя (решение «дилеммы Дизеля») в двигателестроении эффективно не решена до сих пор даже с применением каталитической очистки газов.

Путем регулировки в направлении «рано» можно увеличить давление воспламенения до расчетной точки, что приведет к значительно меньшему расходу топлива. С другой стороны, регулировка в «более позднем» направлении, приводящая к падению давления воспламенения, приводит к значительно более низкому выбросу NO_x (рис. 4) [16].

Это устройство управляется программой, согласованной с условиями эксплуатации и целями по согласованию с заказчиком.

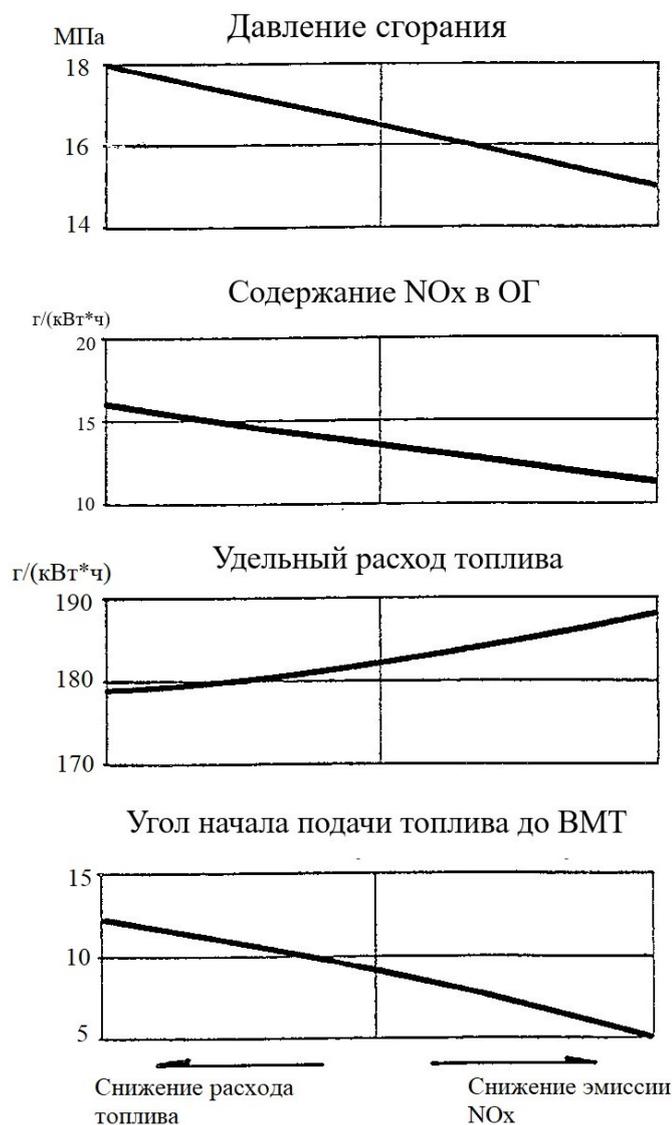


Рис. 4 – Влияние угла начала подачи топлива на давление сгорания, содержание оксидов азота в отработавших газах и удельный расход топлива.

Fig. 4 - Influence of the fuel supply beginning angle on the combustion pressure, the nitrogen oxides content in the exhaust gases and the specific fuel consumption.

В 90-х годах прошлого века такое устройство нашло применение на двигателе L32/40 фирмы MAN B&W.

В обычной системе впрыска, где плунжер впрыскивающего насоса заданной конструкции создавал давление, а также приуроченный и дозированный впрыск, можно было лишь незначительно влиять на переменные «начало впрыска», «продолжительность впрыска» и «давление впрыска».

Совместное влияние на «начало впрыска», «продолжительность впрыска» и «давление впрыска» можно обеспечить электронной системой впрыска. В электронной системе впрыска генерация давления – это одна функция, а время и

дозирование – другая. Для создания давления используется топливный насос высокого давления.

Электронная система впрыска состоит из следующих узлов (рис. 5):

- топливный насос высокого давления, топливопроводы впрыска топлива, аккумулятор давления топлива;
- электро-гидравлический управляемый инжекционный клапан;
- гидравлический контур, служащий в качестве следящего контура для приведения в действие впрыскивающего клапана;
- электронный контроллер для управления впрыском, запуском.

ТНВД подает топливо в аккумулятор, давление в аккумуляторе регулируется датчиком, и, в зависимости от выходной мощности, гидравлическим приводом на топливном насосе. Впрыск осуществляется через электронно-гидравлически управляемый инжекционный клапан, который получает свои управляющие импульсы от электронного контроллера.

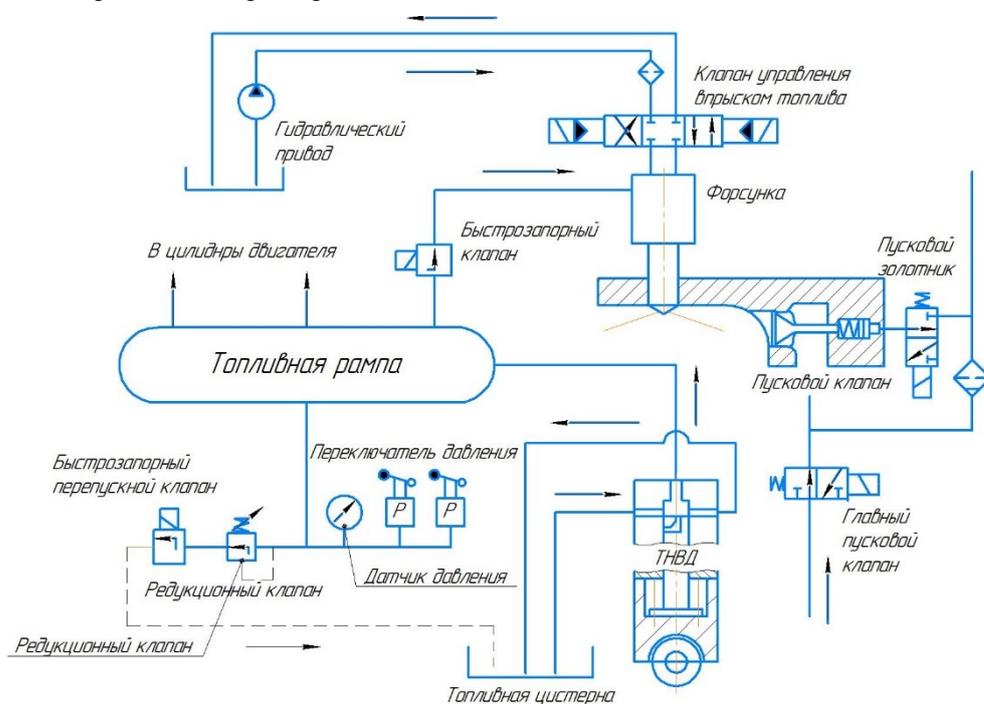


Рис. 5 – Схема электронной системы впрыска топлива.

Fig. 5 – The electronic fuel injection system diagram.

Перед системой механической подачи топлива эта система имеет следующие преимущества:

- гибкое регулирование угла начала подачи и количества подаваемого топлива в цилиндр двигателя в зависимости от многих параметров: атмосферного давления, давления наддувочного воздуха, температуры охлаждающей жидкости, температуры воздуха сгорания и т.д.
- высокое давление впрыска на всех режимах работы двигателя – уменьшение неравномерности подачи топлива по цилиндрам на частичных нагрузках и при холостом ходе, снижение дымности;

– снижение максимального давления и температуры цикла, за счет многократного впрыска топлива, что также положительно сказывается на уменьшении содержания оксидов азота в отработавших газах.

При использовании традиционной системы впрыска температура воспламенения поддерживалась постоянной во всем диапазоне мощности и скорости. Все рабочие значения двигателя были приведены к номинальной мощности при «нормальных условиях окружающей среды» с имеющимся в то время топливом. Сравнительно легко оптимизировать систему впрыска для этой единственной рабочей точки и, следовательно, при номинальной мощности получают удовлетворительные рабочие значения и низкий удельный расход топлива. Однако применявшаяся до сих пор система имела относительно мало возможностей для улучшения смесеобразования. Впрыск большего количества топлива с более высокой скоростью и давлением влечет за собой высокие нагрузки на приводы топливных насосов, кулачки и трубки высокого давления.

При электронном впрыске, когда топливо выходит из аккумулятора, в котором давление постоянно, давление впрыска и, следовательно, напряжения могут быть существенно снижены, при этом топливо более эффективно распыляется и сжигается, так что расход топлива ниже [17, 18]. Эти взаимосвязи показаны на рисунке 6. Максимальное давление сгорания на номинальном режиме остается прежним, при этом за счет тонкости распыливания уменьшается удельный расход топлива на всех режимах работы.

Электронные системы впрыска топлива начали применяться в 1970-х годах на опытных тихоходных двигателях KEZ 52/105 C/CL фирмы MAN B&W с топливной аппаратурой Bosch.

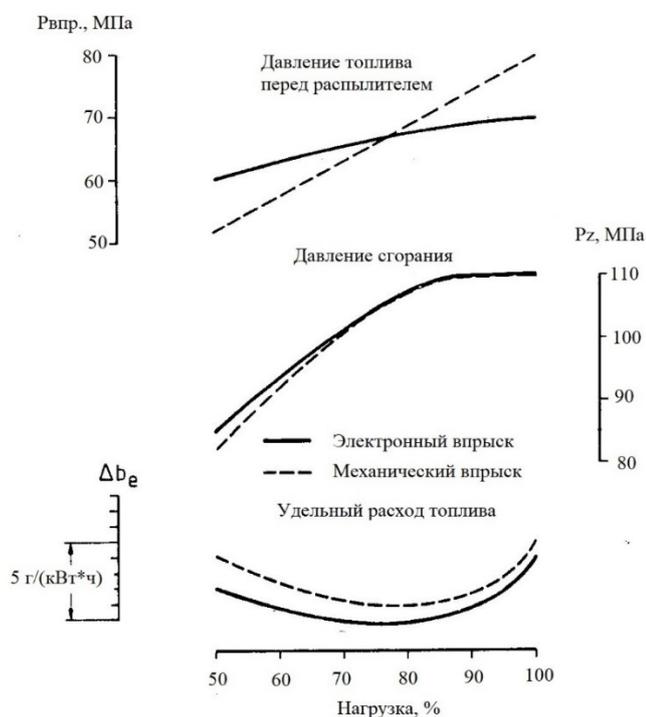


Рис. 6 – Винтовая характеристика. Сравнение основных параметров работы дизеля при электронной и механической системе впрыска.

Fig. 6 – Screw characteristic. . The diesel engine main parameters comparison with electronic and mechanical injection systems.

Заключение

На судовых дизелях, основное время работы которых приходится на работу при постоянной продолжительной нагрузке, широкое распространение получили механические методы управления углом опережения впрыска (поворот распределительного вала, рычажный механизм). Однако для получения высоких энергетических и экологических показателей в настоящее время широкое распространение получает система электронного управления common rail, которая дает более широкие возможности для управления рабочим процессом.

Список литературы

1. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et. Al] // International Journal of Engine research. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3-10.
2. Обозов А.А., Новиков Р.А. Параметрическая оптимизация закона тепловыделения судового малооборотного дизеля // Двигателестроение. 2020. №3 (281). С. 10-12.
3. Атласов Р.Ю., Игнатенко Г.В., Туркин В.А. Оценка влияния регулировочных параметров на экологические характеристики главных судовых дизельных двигателей 7RT-FLEX82T // Эксплуатация морского транспорта. 2019. №3 (92). С. 108-114.
4. Effects of intakes swirl on the fuel/air mixing and combustion performance in a lateral swirl combustion system for direct injection diesel engines / Y. Chen, X. Li, S. Shi, Q. Zhao, D. Liu, J. Chang, F. Liu // Fuel. 2021. Vol. 286. 119376.
5. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine / A.K. Agarwal, D.K. Srivastava, A. Dhar, R.K. Maurya, P.C. Shukla, A.P. Singh // Fuel. 2013. Vol. 111. Pp. 374-383.
6. Марков В.А., Камалтдинов В.Г., Рязанов К.П., Косова Л.Е. Фазы топливopодачи и показатели транспортного дизеля // АвтоГазoЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2019. Т. 18, №5. С. 216-222.
7. YU H., Liang X., Shu G. Numerical study of the early injection parameters on wall wetting characteristics of HCCI diesel engine using early injection strategy // Internal Journal of Automotive Technology. 2017. Vol. 18, №5. Pp. 759-768.
8. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А.С. Орлина, М: 1971 г., 400 с.
9. Риккардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. М., Гострансиздат, 1932; Машгиз, 1960.
10. Из истории развития отечественных быстроходных дизелей. В кн. Некоторые проблемы развития современных транспортных двигателей. Под ред. А.И. Толстова. Труды НИИТД №20, М. 1968, стр. 7 – 36.
11. Толстов А.И., Бельский Д.И., Болдырев И.В. Вопросы горения и организации рабочего процесса в быстроходном дизеле. В кн. Некоторые проблемы развития современных транспортных двигателей. Под ред. А.И. Толстова. Труды НИИТД №20, М. 1968, стр. 37 – 63.
12. Корабельников С.К. Муфта автоматического регулирования угла опережения впрыска топлива // Двигателестроение. 2005. №3 (221). С. 40-43.
13. Кочев Н.С., Плотников Л.В., Григорьев Н.И. Совершенствование процесса топливopодачи тепловозного дизеля 8ЧН21/21, работающего по циклу Миллера // Двигателестроение. 2021. №1 (283). С. 20-25.
14. Болдырев И.В. Особенности сгорания частиц углерода в цилиндре быстроходных двигателей. Под. Ред. Кутового. Труды №18 НИИ, М. 1966, стр. 45-63.
15. L58/64: designing for power with strength. The Motor Ship. December 1983. P.30 – 31.
16. MAN B&W. Guide Project L32/40.
17. G. Kattenbusch, H. Krug, H. Zapf. Design and operating method. The Motor Ship. December, 1979. p. 32, 35
18. Wolfgang Klaunig. Improving engine performance with electronically-controlled injection. The Motor Ship. November, 1979. №712, p. 71-72.

References

1. IJER editorial: The future of the internal combustion engine / Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et. Al] // International Journal of Engine research. 2020. Vol. 21 (1). Pp. 3-10.
2. Obozov A.A., Novikov R.A. Parametricheskaya optimizatsiya zakona teplovydeleniya sudovogo malooborotnogo dizelya [Parametric optimization of the law of heat release of a marine low-speed diesel engine] // Dvigatelistroyeniye. 2020. №3 (281).). pp. 10-12, (In Russ).
3. Atlasov R. Yu, Ignatenko G.V., Turkin V.A. Otsenka vliyaniya regulirovochnykh para-metrov na ekologicheskiye kharakteristiki glavnykh sudovykh dizel'nykh dvigateley 7RT-FLEX82T [Assessment of the influence of adjusting parameters on the environmental characteristics of the main marine diesel engines 7RT-FLEX82T] // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2019. №3 (92). pp. 108-114 (In Russ).
4. Effects of intakes swirl on the fuel/air mixing and combustion performance in a lateral swirl combustion system for direct injection diesel engines / Y. Chen, X. Li, S. Shi, Q. Zhao, D. Liu, J. Chang, F. Liu // Fuel. 2021. Vol. 286. 119376.
5. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine / A.K. Agarwal, D.K. Srivastava, A. Dhar, R.K. Maurya, P.C. Shukla, A.P. Singh // Fuel. 2013. Vol. 111. Pp. 374-383.
6. Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Ryazanov K.P., Kosova L.E. Fazy toplivopodachi i pokazateli transportnogo dizelya [Fuel supply phases and indicators of a transport diesel engine] // AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Al'ternativnoye toplivo. 2019. T. 18, №5. Pp. 216-222 (In Russ)
7. YU H., Liang X., Shu G. Numerical study of the early injection parameters on wall wet-ting characteristics of HCCI diesel engine using early injection strategy // Internal Journal of Automotive Technology. 2017. Vol. 18, №5. Pp. 759-768.
8. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teoriya rabochikh protsessov porshnevnykh i kombi-nirovannykh dvigateley [Internal combustion engines. Theory of working processes of reciprocating and combined engines]. Editor Orlina A.S. M: 1971. P 400 (In Russ).
9. Rikkardo G.P. Bystrokhodnyye dvigateli vnutrennego sgoraniya [High-speed internal combustion engines]. M: Gostransizdat, 1932. Mashgiz. 1960.
10. Iz istorii razvitiya otechestvennykh bystrokhodnykh dizeley. V kn. Nekotoryye pro-blemy razvitiya sovremennykh transportnykh dvigateley. [From the history of the development of domestic high-speed diesel engines. In the book. Some problems in the development of modern transport engines.] Under. Ed. Tolstov A.I. Trudy NIITD №20, M. 1968. Pp. 7 – 36. (In Russ)
11. Tolstov A.I, Bel'skiy D.I., Boldyrev I.V. Voprosy goreniya i organizatsii rabo-chego protsessa v bystrokhodnom dizele. V kn. Nekotoryye problemy razvitiya sovremennykh transportnykh dvigateley. [Combustion and organization of the working process in a high-speed diesel engine. In the book. Some problems in the development of modern transport engines.] Under. Ed. Tolstov A.I. Trudy NIITD №20, M. 1968. Pp. 37 – 63. (In Russ)
12. Korabel'nikov S.K. Mufta avtomaticheskogo regulirovaniya ugla operezheniya vpryska topliva [Clutch for automatic control of the fuel injection advance angle] // Dvigatelistroyeniye. 2005. №3 (221). Pp. 40-43. (In Russ)
13. Kochev N.S., Plotnikov L.V., Grigor'yev N.I. Sovershenstvovaniye protsessa topli-vopodachi teplovoznogo dizelya 8ЧН21/21, rabotayushchego po tsiklu Millera [Improvement of the fuel supply process of a diesel locomotive 8ЧН21/21 operating according to the Miller cycle] // Dvigatelistroyeniye. 2021. №1 (283). Pp. 20-25. (In Russ)
14. Boldyrev I.V. Osobennosti sgoraniya chastits ugleroda v tsilindre bystrokhodnykh dvigateley [Features of combustion of carbon particles in the cylinder of high-speed engines] Under. Ed. Kutovoy. Trudy №18 NII, M. 1966. Pp. 45-63. (In Russ)
15. L58/64: designing for power with strength. The Motor Ship. December 1983. Pp.30 – 31.
16. MAN B&W. Guide Project L32/40.
17. G. Kattenbusch, H. Krug, H. Zapf. Design and operating method. The Motor Ship. December, 1979. Pp. 32-35
18. Wolfgang Klaunig. Improving engine performance with electronically-controlled injection. The Motor Ship. November, 1979. №712. Pp. 71-72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрусенко Сергей Евгеньевич, к.т.н.,
начальник отдела по системам двигателя, АО
«РУМО», 603061, г. Нижний Новгород, ул.
Адмирала Нахимова, 13, e-
mail: info@aorumo.ru

Sergey E. Andrusenko, Sci. Tech, The chief
engineer of Engine System Department, AO
«RUMO», Russia, 13, Adm. Nahimova, Nizhny
Novgorod, 603061, e-mail: info@aorumo.ru

Андрусенко Олег Евгеньевич, к.т.н.,
старший инженер-инспектор, Морской
Регистр Судоходства, Болгария, 9000, Варна,
ул. Дебър, д. 18, e-mail:
oeandrusenko@gmail.com

Oleg E. Andrusenko, Sci. Tech. Surveyor,
Russian Maritime Register of Shipping, Ul.
Debar, 18, 9000, Varna, Bulgaria, e-mail:
oeandrusenko@gmail.com

Кольванов Владимир Викторович, к.т.н.,
доцент кафедры «Эксплуатация судовых
энергетических установок», Волжский
государственный университет водного
транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул.
Нестерова, 5, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Vladimir V. Kolyvanov, Sci. Tech, Associate
Professor of the Department Operation of Ship
Power Plants, Volga State University of Water
Transport, Russia, 5, Nesterova, Nizhny
Novgorod, 603950, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Матвеев Юрий Иванович, д.т.н., профессор
кафедры «Эксплуатация судовых
энергетических установок», Волжский
государственный университет водного
транспорта, 603950, Нижний Новгород, ул.
Нестерова, 5, e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Yuri I. Matveev, D.Sc., Professor of the
Department Operation of Ship Power Plants,
Volga State University of Water Transport,
Russia, 5, Nesterova, Nizhny Novgorod, 603950,
e-mail: kaf_eseu@vsuwt.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2021; опубликована онлайн 15.09.2021
Received 08.06.2021; published online 15.09.2021