



Численное исследование показателей тепловыделения дизеля от зазора прецизионных элементов топливной аппаратуры

В процессе эксплуатации дизеля происходит износ прецизионных сопряжений топливной аппаратуры (ТА), изменяются геометрические размеры деталей, зазоры в прецизионных парах. Одной из причин снижения удельных показателей дизеля в эксплуатации — уменьшения экономичности и повышения токсичности отработавших газов — является увеличение по причине износа зазоров между деталями топливной аппаратуры в плунжерной паре и распылителе [1–4].

При использовании в дизельных двигателях альтернативных топлив с вязкостными характеристиками, отличными от нефтяных топлив, важность оценки утечек топлива в топливной аппаратуре и влияния на рабочий процесс и эффективность использования теплоты в цикле является несомненной [5–8].

Для численного исследования утечек топлива принят метод гидродинамического расчёта классической разделённой системы впрыскивания топлива (рис. 1) [9–10].

В полости насоса высокого давления утечки топлива имеют место по зазорам направляющей части плунжера в отсечное Q_{oo} и наполнительное $Q_{но}$ отверстия, а также по компрессионной части Q_k ; в полости форсунки утечки топлива наблюдаются по направляющей части иглы форсунки $Q_{ф}$ [9].

Утечки топлива через зазоры в поршневой (компрессионной) части плунжера:

$$Q_k = \frac{0,036 A d_{пл}}{l_{пл}} p_{н1} \quad (1)$$

Утечки топлива в наполнительное отверстие:

$$Q_{но} = \frac{0,072 A n_o (p_{н1} - p_b)}{\ln \left[\frac{2(h - h_b) \sin(\beta_b)}{r_b} - 3 \right]} \quad (2)$$

Утечки топлива в отсечное отверстие:

$$Q_{oo} = \frac{0,072 A n_o (p_{н1} - p_b)}{\ln \left[\frac{2(h_o - h) \sin(\beta_o)}{r_o} + 1 \right]} \quad (3)$$

$$\text{где } A = \frac{(\delta_{пл} + 0,652 \times 10^{-13} p_{н1})^3}{\nu \rho};$$

где p_b , p_o и $p_{н1}$ — давление топлива, соответственно, в наполнительной и отсечной магистрали и в полости над плунжером в начале расчётного интервала; $\delta_{пл}$ — зазор в компрессионной части плунжера;

При использовании в дизелях альтернативных топлив несомненно важность оценки утечек топлива в топливной аппаратуре и влияния на рабочий процесс и эффективность использования теплоты в цикле

Рецензия эксперта на статью получена 25.01.2019 [Expert review on the article received January 25, 2019].

УДК 536.2. Научная специальность: 05.04.02.

Численное исследование показателей тепловыделения дизеля от зазора прецизионных элементов топливной аппаратуры

Андрей Е. Свистула, д.т.н., декан факультета энергомашиностроения и автомобильного транспорта (ФЭАТ), заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» (ДВС); **Алексей Г. Кузьмин**, к.т.н., доцент кафедры ДВС; **Александр С. Арефьев**, студент магистратуры, Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова (АлтГТУ)

Приведены результаты исследования влияния зазоров в прецизионных сопряжениях топливной аппаратуры, геометрических размеров деталей, режима работы двигателя на утечки топлива. Установлена связь величины утечек в прецизионных сопряжениях и параметров впрыска топлива, рабочего процесса дизеля, эффективности использования теплоты в цикле.

Ключевые слова: дизельная топливная аппаратура, зазор, прецизионные сопряжения, утечки топлива, метод анализа, индикаторный КПД.

UDC 536.2. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Numerical investigation of indicators of heat discharge of a diesel from the gap of precision elements of fuel equipment

Andrey E. Svistula, Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Power Engineering and Automobile Transport (FPEAT), Head of the Department of Internal Combustion Engines (ICE); **Alexey G. Kuzmin**, PhD, Associate Professor, Department of ICE; **Alexander S. Arefyev**, graduate student, Polzunov Altai State Technical University (Barnaul city)

The results of the study of the effect of gaps in precision interfaces of fuel equipment, the geometric dimensions of parts, and the engine operating mode on fuel leaks are presented. A relationship has been established between the magnitude of leaks in precision interfaces and fuel injection parameters, the diesel engine workflow, and the efficiency of using heat in a cycle.

Key words: diesel fuel equipment, clearance, precision interfaces, fuel leakage, analysis method, indicator efficiency.

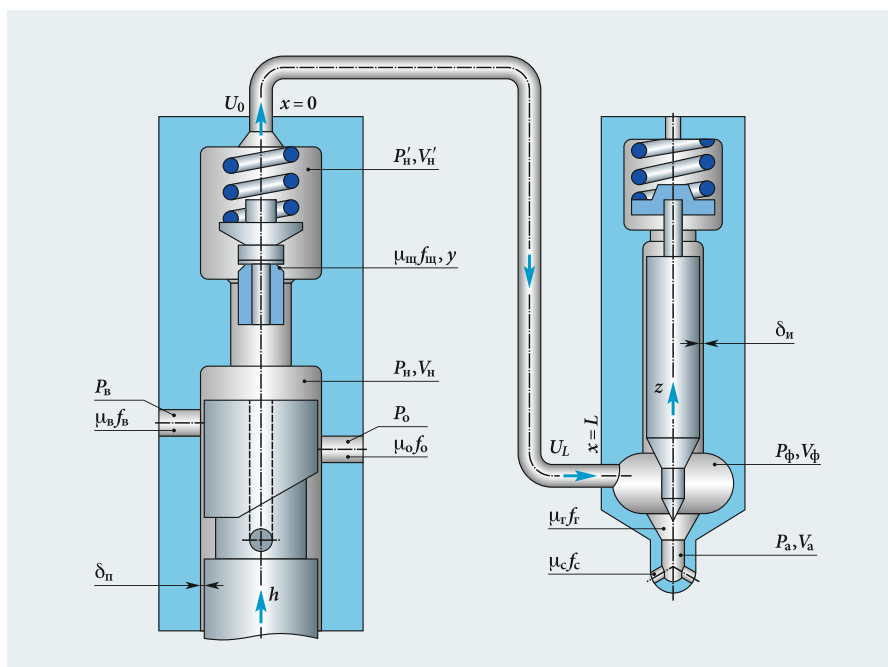


Рис. 1. Расчётная схема классической топливной системы

ν и ρ — динамическая вязкость и плотность топлива; d_n и l_n — диаметр плунжера и длина компрессионной части плунжера; n_b и n_o — количество наполнительных и отсечных отверстий; h — ход плунжера; h_b — расстояние от нагнетательной кромки до нижней кромки наполнительного отверстия; h_o — длина золотниковой части плунжера под отсечным отверстием; r_b и r_o — радиусы наполнительного и отсечного отверстий; β_b и β_o — углы наклона нагнетательной и отсечной кромки плунжера к его оси.

Утечки топлива через зазор между иглой и корпусом распылителя:

$$Q_{yf} = \frac{\pi d_n^3 p_{f1}}{96 \nu l_n}, \quad (4)$$

где d_n и l_n — диаметр и длина компрессионной части иглы; δ_n — зазор между иглой и корпусом распылителя; p_{f1} — давление в кармане корпуса распылителя в начале расчётного интервала времени.

Для анализа тепловыделения и индикаторного КПД поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) использован метод [11–13], апробированный на кафедре «Двигатели внутреннего сгорания» АлтГТУ, в соответствии с которым индикаторный КПД η_i представляет собой разность относительного количества располагаемой теплоты, введённой в цикл, и долей потерянной ΔX_{np} и неиспользуемой δ_i теплоты в цикле:

$$\eta_i = 1 - \Delta X_{np} - \delta_\Sigma - \delta_{nc} - \delta_k - \delta_w, \quad (5)$$

где неиспользование теплоты δ_i определяется по уравнению непосредственной связи индикаторного КПД с характеристиками выделения и отвода теплоты от рабочего тела, которые описывают одну из сторон внутрицилиндровых процессов: выгорания топлива, теплообмена,

ности ввода [11], переменности состава и температуры рабочего тела, по причине отвода теплоты по ходу развития цикла [12–13].

Расчётно-экспериментальные исследования проводились применительно к топливной аппаратуре типа ТН 10×10 дизеля размерностью 13/14 [7].

Наибольшие утечки в плунжерной паре (более 95%) наблюдаются в наполнительное и отсечное отверстия и лишь менее 5% — через компрессионную часть плунжера (рис. 2). Наибольшая скорость утечек наблюдается в момент впрыска и продолжается в течение 8–10° п.к.н. Утечки через компрессионную часть плунжера уменьшаются с увеличением её длины и могут быть практически устранены введением аккумулирующего объёма в виде кольцевых канавок. Утечки

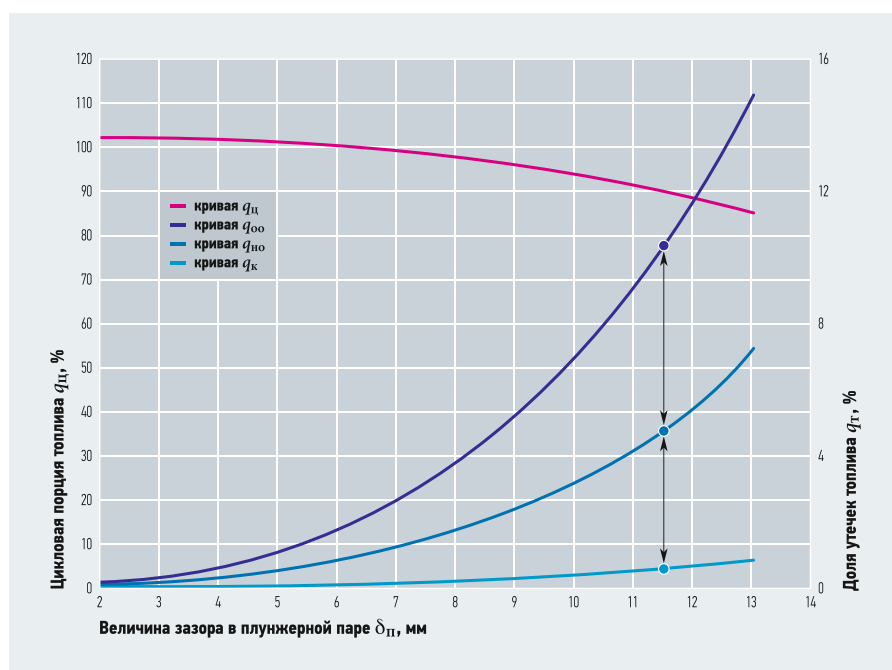


Рис. 2. Влияние зазора в плунжерной паре на цикловую подачу и утечки топлива

диссоциации и пр., и выражается коэффициентами неиспользования теплоты δ_Σ , δ_{nc} , $\delta_k = \delta_c + \delta_i$ и δ_w , соответственно: в эталонном цикле, от несвоевремен-

Для анализа тепловыделения и индикаторного КПД поршневого ДВС использован метод, апробированный в АлтГТУ, в соответствии с которым индикаторный КПД представляет собой разность относительного количества располагаемой теплоты, введённой в цикл, и долей потерянной и неиспользуемой теплоты в цикле

топлива через зазор между иглой и корпусом распылителя форсунки очень незначительны и составляют сотые доли процента от общего объёма утечек. С увеличением зазора в плунжерной паре (рис. 2) утечки резко возрастают. Следует отметить, что износ плунжерной пары происходит неравномерно, даже при небольшом среднем зазоре утечки могут достигать значительных величин.

Увеличение диаметра плунжера приводит к относительному уменьшению площади зазора и, соответственно (при неизменной цикловой подаче топлива), к снижению доли утечек при одновременном росте динамики впрыска — увеличивается давление и сокращается продолжительность впрыска.

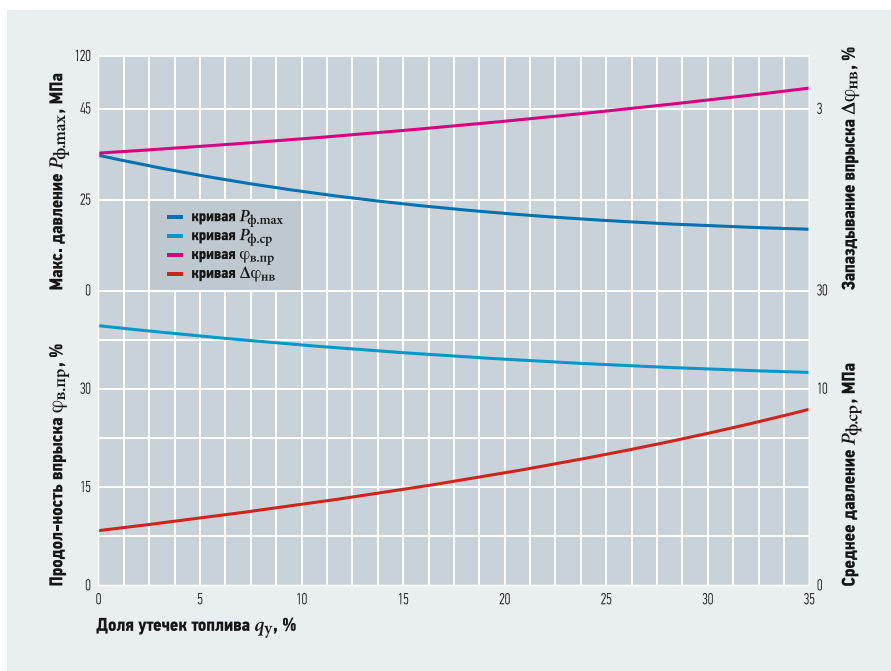


Рис. 3. Зависимость параметров впрыска от относительной величины суммарных утечек топлива ($q_{ц} = \text{const}$)

С увеличением относительной величины суммарных утечек топлива q_y (рис. 3) наблюдается запаздывание угла начала подачи топлива $\Delta\varphi_{ив}$, уменьшение максимального $P_{ф,мах}$ и среднего $P_{ф,ср}$ давлений и, соответственно, объёмной скорости впрыскивания, увеличение продолжительности подачи топлива $\varphi_{в,пр}$ (при сохранении цикловой порции топлива, поданной в цилиндр). Следует отметить, что при достижении относительной величины утечек более 15% объёмная скорость поступления топлива в форсунку снижается настолько, что возможна промежуточная посадка иглы форсунки и дробный впрыск топлива. Отмеченное явление приводит к дополнительному увеличению продолжительности впрыскивания топлива, снижению давления и, соответственно, динамики впрыскивания топлива.

На рис. 4 показано изменение параметров тепловыделения и баланса теплоты в зависимости от суммарных утечек топлива при условии сохранения неизменными угла начала подачи топлива $\varphi_{ив}$ и цикловой порции топлива $q_{ц}$, поданной в цилиндр. Рост тепловыделения в диффузионной фазе в более поздний период относительно верхней мёртвой точки (ВМТ) приводит к значительному увеличению коэффициентов, определяемых несвоевременностью ввода теплоты $\delta_{нс}$ на 1,5% и её неполнотой $\Delta_{нп}$ на 1%. Другие коэффициенты не претерпевают существенных изменений. В целом, увеличение утечек топлива q_y до 30% вызывает падение индикаторного КПД η_i на 0,02, что составляет более 4,5% от его величины.

С увеличением утечек топлива q_y до 30% одновременно происходит запазды-

Численным методом исследовано влияние утечек топлива через зазоры в прецизионных деталях топливной аппаратуры на параметры впрыска, рабочего процесса и индикаторный КПД

вание угла начала впрыска топлива $\varphi_{ив}$ (рис. 3). Такое изменение характеристики впрыска приводит к снижению среднего индикаторного давления P_i , индикаторного КПД η_i , что вызвано значительным ростом коэффициентов несвоевременности $\delta_{нс}$ и неполноты $\Delta_{нп}$ ввода теплоты, соответственно, на 2,5% и 1,5% (рис. 5). В целом, индикаторный КПД η_i снижается на 0,037, что составляет почти 8% к уровню его начального значения. Итак, увеличение утечек топлива до 30% по от-

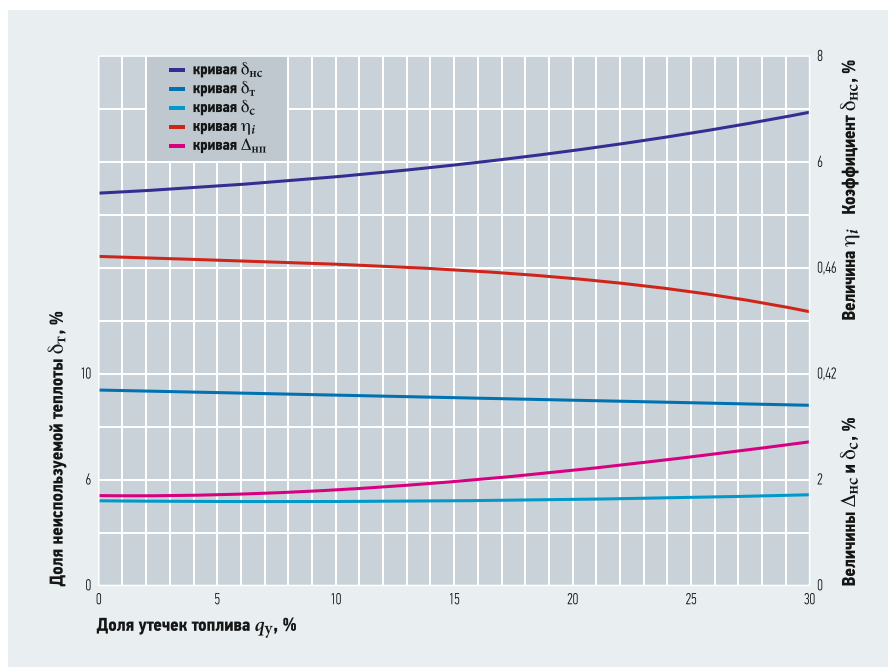


Рис. 4. Параметры тепловыделения и составляющие баланса теплоты в зависимости от суммарной утечки топлива ($q_{ц} = \text{const}$, $\varphi_{ив} = \text{const}$, $n = \text{const}$)



ношению к цикловой порции даже при их компенсации увеличением активного хода плунжера приводит к снижению индикаторной экономичности на 8%.

Итак, численным методом исследовано влияние утечек топлива через зазоры в прецизионных деталях топливной аппаратуры на параметры впрыска, рабочего процесса и индикаторный КПД. Установлена количественная и качественная связь величины утечек в прецизионных элементах и параметров рабочего процесса дизеля, эффективности использования теплоты в цикле: наличие утечек вызывает снижение относительной скорости впрыска топлива, рост коэффициентов несвоевременности $\delta_{нс}$ и неполноты $\Delta_{нп}$

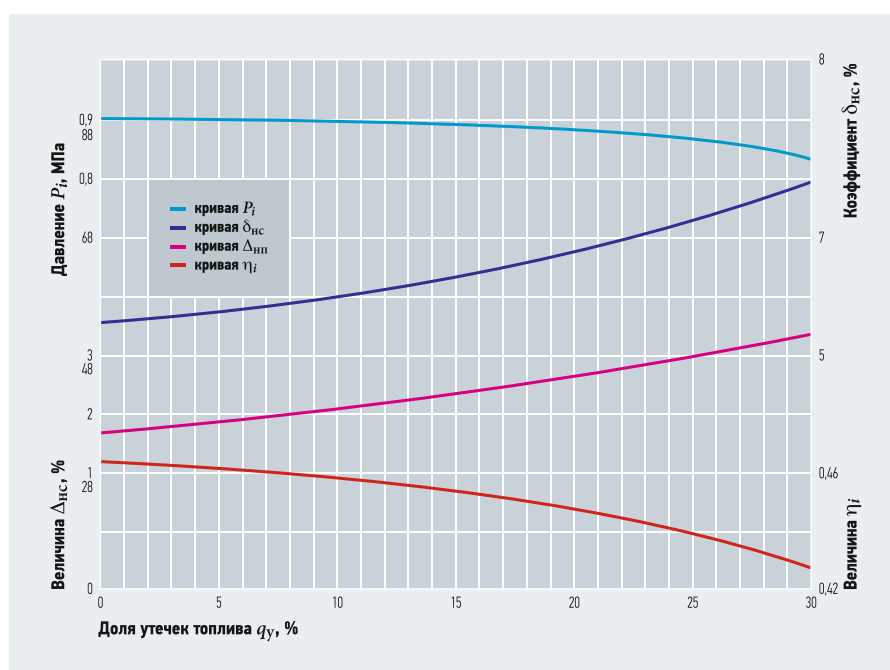


Рис. 5. Составляющие баланса теплоты в зависимости от суммарной утечки топлива ($q_{лц} = \text{const}$, $\varphi_{нв} = \text{var}$, $n = \text{const}$)



ввода теплоты, что определяет снижение индикаторного КПД η_i на 8 %. Целесообразно выполнять оценку утечек топлива в топливной арматуре, изменения параметров рабочего процесса и эффективности использования теплоты в цикле при переводе двигателя на альтернативные топлива [6, 8, 14] для разработки эффективных конструктивных и технологических мероприятий [15].

1. Астахов И.В., Трусов В.И., Хачиян А.С. и др. Подача и распыливание топлива в дизелях. — М.: Машиностроение, 1972. 359 с.
2. Таусенев Е.М., Свистула А.Е. Надёжность, основные неисправности и причины отказов насосов высокого давления аккумуляторных топливных систем дизелей // Машиностроение и компьютерные технологии, 2012. №9. С. 7.
3. Таусенев Е.М., Свистула А.Е. Применение теплоизоляторов при ремонте, техническом обслуживании и модернизации топливной аппаратуры дизелей, постановка цели, выбор объекта и методов исследования // Машиностроение и компьютерные технологии, 2012. №8. С. 4.
4. Матиевский Г.Д., Свистула А.Е. Оптимизационная скоростная характеристика двигателя // Вестник СО Академии военных наук, 2011. №10. С. 111.
5. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля: Монография. — Луганск: Изд-во СЛУ им. В. Даля, 2009. 240 с.
6. Мысник М.И., Свистула А.Е. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания // Ползуновский вестник, 2009. №1–2. С. 37–43.
7. Свистула А.Е., Свистула И.А., Фролкин А.С. Опыт использования рапсового масла в качестве топлива для дизелей ПО «АМЗ» / В сб.: Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ). — Барнаул: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Институт химической кинетики и горения СО РАН, АлтГТУ. Изд-во «Алтайский дом печати», 2008. С. 226–229.
8. Мысник М.И., Свистула А.Е. Исследование характеристик струи рапсового масла, распылённого форсункой Common Rail // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования, 2016. Т. 3. №1. С. 21–25.
9. Ивановский В.Г., Никонов Г.В., Фомин Ю.Я. Топливная аппаратура дизелей. — М.: Машиностроение, 1982. 168 с.
10. Мысник М.И., Свистула А.Е. Метод гидродинамического расчёта комбинированной системы питания дизельного двигателя / В сб.: Повышение экологической безопасности автотракторной техники сборник статей. — Барнаул: Российская Академия транспорта, АлтГТУ, 2010. С. 67–73.
11. Матиевский Д.Д. Анализ экономичности использования тепла в расчётном цикле ДВС // Известия ВУЗов. Серия: Машиностроение, 1981. №8. С. 71–74.
12. Matievsky D.D., Svistula A.E. The influence of effective utilization degree of diesel engine cylinder air charge on soot emission and indicated efficiency. Vilnius. Technika: Transport. 2005. No. 3. Pp. 96–98.
13. Матиевский Д.Д., Свистула А.Е. Несвоевременность выделения теплоты в циклах ДВС // Ползуновский вестник, 2007. №4. С. 79–87.
14. Марков В.А., Иващенко Н.А., Девянин С.Н., Нагорнов С.А. Использование биотоплив на основе растительных масел в дизелях // Вестник МГТУ. Серия: Машиностроение, 2012. Спец. вып. №7. С. 74–81.
15. Матиевский Д.Д., Приходько Е.Е., Свистула А.Е. Применение металлолакирующих составов в ДВС / Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Мат. науч.-практ. семинара ВлГУ. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 1997. С. 30–31.

References — see page 96.

Numerical investigation of indicators of heat discharge of a diesel from the gap of precision elements of fuel equipment. Pp. 90–93.

Andrey E. Svistula, Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Power Engineering and Automobile Transport (FPEAT), Head of the Department of Internal Combustion Engines (ICE); **Alexey G. Kuzmin**, PhD, Associate Professor, Department of ICE; **Alexander S. Remyev**, graduate student, Polzunov Altai State Technical University (Barnaul city)

1. Astahov I.V., Trusov V.I., Hachijan A.S. et al. *Podacha i raspylivanie topliva v dizel'nykh* [Feed and atomization of fuel in diesel engines]. Moscow. *Mashinostroenie* ["Machine Building" Publishing House]. 1972. 359 p. [In Russian]
2. Tausenev E.M., Svistula A.E. *Nadezhnost', osnovnye neispravnosti i prichiny otkazov nasosov vysokogo davleniya akkumuljatornykh toplivnykh sistem dizelej* [Reliability, major malfunctions and causes of failures of high-pressure pumps of diesel accumulator fuel systems]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tehnologii* ["Machine Building and computer technology" Magazine]. 2012. No. 9. P. 7. [In Russian]
3. Tausenev E.M., Svistula A.E. *Primenenie teploizoljatorov pri remonte, tehničeskomo obsluzhivanii i modernizacii toplivnoj apparatury dizelej, postanovka tseli, vybor ob'ekta i metodov issledovaniya* [The use of insulators in the repair, maintenance and modernization of diesel fuel equipment, setting goals, the choice of object and research methods]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tehnologii* ["Machine Building and computer technology" Magazine]. 2012. No. 8. P. 4. [In Russian]
4. Matievskij G.D., Svistula A.E. *Optimizacionnaja skorostnaja harakteristika dvigatelja* [Optimization speed characteristic of the engine]. *Vestnik Sibirskogo otdeleniya Akademii voennykh nauk* [Bulletin of the Siberian Branch of the Academy of Military Sciences]. 2011. No. 10. P. 111. [In Russian]
5. Vasil'ev I.P. *Vlijanie topliv rastitel'nogo proishozhdeniya na jekologičeskije i jekonomičeskije pokazateli dizelej: Monografija* [Influence of vegetable fuels on the environmental and economic performance of diesel: Monograph]. Lugansk. *Izd-vo SNU im. V. Dalja* [Publishing House of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University]. 2009. 240 p. [In Russian]
6. Mysnik M.I., Svistula A.E. *Analiz teplofizičeskikh svoystv al'ternativnykh topliv dlja dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Analysis of the thermophysical properties of alternative fuels for internal combustion engines]. *Polzunovskij vestnik* ["Polzunov's bulletin" Magazine]. 2009. No. 1–2. Pp. 37–43. [In Russian]
7. Svistula A.E., Svistula I.A., Frolkin A.S. *Opyt ispol'zovaniya rapsovykh masel v kachestve topliva dlja dizelej PO "AMZ". V sb.: Jenergetičeskije, jekologičeskije i tehnologičeskije problemy jekonomiki (JeJeTPE)* [Experience of using rapeseed oil as fuel for diesels of AMZ. Coll. vol. "Energy, environmental and technological problems of the economy" (EETPE)]. Barnaul. *Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, Institut vodnykh i jekologičeskikh problem SO RAN, Institut himičeskoi kinetiki i gorenija SO RAN, AltGTU* [Kutateladze Institute of Thermal Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Water and Ecological Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Chemical Kinetics and Combustion of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Polzunov Altai State Technical University]. *Izd-vo "Altajskij dom pečati"* ["Altai House of Printing" Publishing House]. 2008. Pp. 226–229. [In Russian]
8. Mysnik M.I., Svistula A.E. *Issledovanie harakteristik strui rapsovykh masel, raspylnnogo for-sunkoj Common Rail* [Study of the characteristics of a stream of rapeseed oil sprayed with a Common Rail nozzle]. *Al'ternativnye istočniki jenergii v transportno-tehnologičeskomo komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovaniya* ["Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects for rational use" Magazine]. 2016. T. 3. No. 1. Pp. 21–25. [In Russian]
9. Ivanovskij V.G., Nikonov G.V., Fomin Ju. Ja. *Toplivnaja apparatura dizelej* [Fuel equipment of diesel engines]. Moscow. *Mashinostroenie* ["Machine Building" Publishing House]. 1982. 168 p. [In Russian]
10. Mysnik M.I., Svistula A.E. *Metod gidrodinamicheskogo raschjota kombinirovannoj sistemy pitaniya dizel'nogo dvigatelja. V sb.: Povyšenie jekologičeskoi bezopasnosti avtotraktornoj tehniki sbornik statej* [The method of hydrodynamic calculation of the combined power supply system of a diesel engine. Coll. vol. "Improving the environmental safety of automotive equipment"]. Barnaul. *Rossijskaja Akademiya transporta, AltGTU* [Russian Academy of Transport: All-Russian public organization, Polzunov Altai State Technical University]. 2010. Pp. 67–73. [In Russian]
11. Matievskij D.D. *Analiz jekonomičnosti ispol'zovaniya tepla v raschetnom tsikle DVS* [Analysis of the efficiency of heat use in the design cycle of an internal combustion engine]. *Izvestija VUZov. Serija: Mashinostroenie* ["Proc. of Higher Educational Institutions" Magazine. Series: Machine Building]. 1981. No. 8. Pp. 71–74. [In Russian]
12. Matievskij D.D., Svistula A.E. *The influence of effective utilization degree of diesel engine cylinder air charge on soot emission and indicated efficiency*. Vilnius. *Technika: Transport*. 2005. No. 3. Pp. 96–98.
13. Matievskij D.D., Svistula A.E. *Nesvoevremennost' vydeleniya teploty v tsiklah DVS* [The untimely allocation of heat in the cycles of the internal combustion engine]. *Polzunovskij vestnik* ["Polzunov's bulletin" Magazine]. 2007. No. 4. Pp. 79–87. [In Russian]
14. Markov V.A., Ivashchenko N.A., Devjanin S.N., Nagornov S.A. *Ispol'zovanie biotopliv na osnove rastitel'nykh masel v dizel'nykh dvigatel'nykh agregatakh* [The use of biofuels based on vegetable oils in diesel engines]. *Vestnik MG TU. Serija: Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Machine Building]. 2012. Special issue No. 7. Pp. 74–81. [In Russian]
15. Matievskij D.D., Prihod'ko E.E., Svistula A.E. *Primenenie metalloplakirujushchih sostavov v DVS* [The use of metal cladding compositions in internal combustion engines]. *Sovershenstvovanie mošhnostnykh, jekonomičeskikh i jekologičeskikh pokazatelej DVS: Mat. nauchn.-prakt. seminar VIGU* [Improving the power, economic and environmental performance of the internal combustion engine: Proc. of the scientific and practical seminar of the Vladimir State University]. Vladimir. *Izd-vo VIGU* [Publishing House of the Vladimir State University]. 1997. Pp. 30–31. [In Russian]