

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.436

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.С. Кочев, Л.В. Плотников

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты экспериментального исследования распыла перегретой воды через каналы (отверстия в форсунке), характерные для поршневых двигателей внутреннего сгорания, при разных начальных условиях. В работе кратко рассмотрены преимущества и недостатки современных топливоподающих систем дизельных двигателей. Сформулирован и кратко описан процесс взрывного вскипания применительно к топливной системе дизеля. Представлены результаты распыла перегретой воды через цилиндрический канал и через форсунку действующего дизеля размерности 21/21. Предложена схема реализации топливоподачи в дизельном двигателе с использованием эффекта взрывного вскипания. Предварительные оценки показали, что применение такой топливной системы приведет к повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания двигателя, снижению удельного расхода топлива до 2% и уменьшению количества вредных веществ в отработавших газах в среднем на 12%.

Ключевые слова: взрывное вскипание, топливная система, процесс смесеобразования, поршневой двигатель внутреннего сгорания, надежность и экологичность двигателей.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-45-53

INCREASING THE RELIABILITY OF PISTON ENGINES BY THE IMPROVEMENT OF THE MIXING PROCESS

Y.M. Brodov, B.P. Zhilkin, N.S. Kochev, L.V. Plotnikov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: The article presents the results of an experimental study of the spraying of superheated water through channels (holes in the nozzle), characteristic of piston internal combustion engines, under different initial conditions. The paper briefly discusses the

advantages and disadvantages of modern fuel systems of diesel engines. The process of explosive boiling is briefly described with reference to the diesel fuel system. The results of spraying superheated water through a cylindrical channel and through a nozzle of an operating diesel of dimension 21/21 are presented. The scheme for the implementation of the diesel fuel system with the use of the explosive boiling effect is proposed. Preliminary estimates have shown that the use of such a fuel system will lead to an increase in the reliability of the elements forming the combustion chamber of the engine, reducing the specific fuel consumption to 2 % and reducing the amount of harmful substances in the exhaust gases by an average of 12 %.

Keywords: *explosive boiling, fuel system, mixture formation process, piston internal combustion engine, reliability and environmental friendliness of engines.*

Введение

На сегодняшний день поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) широко используются во всех отраслях народного хозяйства Российской Федерации, в том числе в малой энергетике (мобильные и стационарные электростанции на базе ПДВС) и большой энергетике (силовые установки для обеспечения аварийного электроснабжения на тепловых электрических станциях). Поэтому повышение надежности основных агрегатов и систем поршневых ДВС является одной из актуальных задач в области двигателестроения. При этом известно, что около 50% отказов в автомобильных бензиновых двигателях и до 90% отказов дизельных двигателей приходится на топливную систему [1–3]. Таким образом, повышению надежности топливной системы поршневого ДВС следует уделять повышенное внимание.

Одновременно с этим, современные тенденции ужесточения экологических норм для выхлопных газов заставляют производителей поршневых двигателей искать пути снижения эмиссии вредных веществ. В первую очередь данная проблема решается за счет модернизации топливных систем, что делает их более сложными и нагруженными. В частности, увеличение объемной скорости и давления впрыскивания топлива позволяет производить более тонкий распыл топлива в камере сгорания, что приводит к его более полному сгоранию, но требует высокого качества изготовления деталей топливных систем; это, соответственно, увеличивает их стоимость. Также повышаются потери мощности двигателя на привод топливного насоса высокого давления (ТНВД) и снижается надежность системы в целом.

Так, например, применение аккумуляторных топливных систем с электронным управлением типа *Common Rail* отчасти решает экологические и топливо-экономические задачи, но требует использования сложных блоков управления дизельным двигателем, а также применения множества датчиков и электромагнитных клапанов [4–7]. Традиционные системы топливоподачи в виде блочного топливного насоса высокого давления и гидравлически управляемых форсунок либо насос-форсунок имеют сравнительно простую конструкцию по сравнению с *Common Rail*, что дает им преимущество в части относительной стоимости и надежности. Недостатком является ограниченность по максимальному давлению впрыска и, следовательно, ограниченность по топливной экономичности и экологичности [6]. При этом следует подчеркнуть, что любая топливная система с механическим насосом высокого давления и форсунками имеет узлы и элементы, которые наиболее часто становятся причиной выхода из строя дизеля. Такими элементами являются наименее надежные и наиболее изнашиваемые – прецизионные элементы: распылители, нагнетательные клапаны и плунжерные пары [8–10]. Нередко выходят из строя кулачковый вал и ролики толкателей.

В данной статье представлены результаты разработки оригинальной топливной системы на основе эффекта взрывного вскипания. Данная система позволяет производить

тонкий распыл топлива и в то же время является более надежной, поскольку в ней отсутствует механический ТНВД.

Описание экспериментальной установки

Явление взрывного вскипания основано на процессе резкого фазового перехода жидкость – пар. В качестве рабочей среды может выступать любая жидкость, в зависимости от задач, которые предполагается решить [11; 12].

В данном случае необходимо эффективно распылить топливо в камере сгорания дизельного двигателя, т.е. получить максимально однородную смесь воздуха и топлива. Для этого до подачи топлива в форсунку осуществляется его подогрев до температуры, близкой к термодинамически критической. Подогрев топлива происходит в условиях постоянного объема до температуры выше критической для самой тяжелой фракции, содержащейся в топливе, но ниже температуры разложения самой легкой фракции; одновременно повышается давление выше критического. Такой подогрев приводит к тому, что при попадании топлива в камеру сгорания происходит вскипание, которое вызывает его эффективное распыление и создает равномерное распределение капель топлива по всему объему камеры сгорания.

На рис. 1 показана конструктивная схема рабочей камеры экспериментальной установки, которая обеспечивает стационарное истечение жидкости в течение нескольких десятков секунд. Начальные состояния жидкости в рабочей камере изменялись вдоль линии насыщения или вдоль изобар и охватывали широкий диапазон параметров, включая условия взрывного вскипания. Более подробное описание экспериментальной установки и методики проведения опытов представлено в работе [13]. В данном исследовании рабочей жидкостью являлась вода.

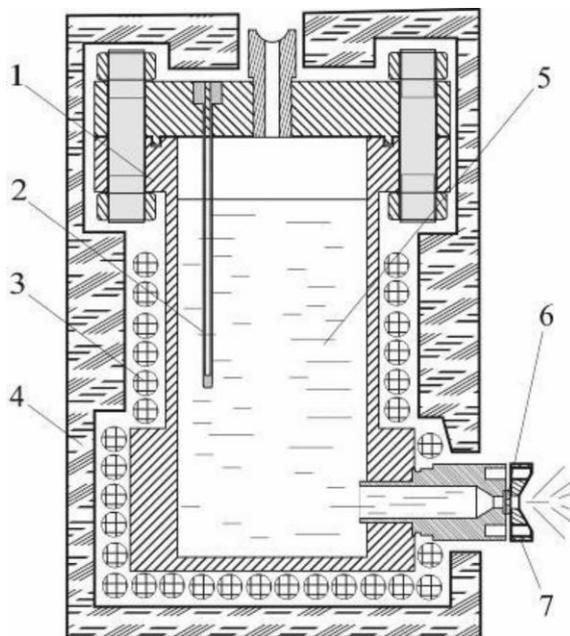


Рис. 1. Схема рабочей камеры экспериментальной установки: 1 – корпус камеры; 2 – кожух для термопары; 3 – нагревательный элемент; 4 – теплоизолятор; 5 – жидкость; 6 – канал; 7 – прижимной фланец

На рис. 2 показан распыливающий насадок с цилиндрическим каналом и его основные размеры.

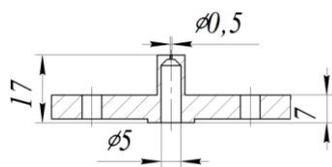


Рис. 2. Распыливающий насадок с цилиндрическим каналом

В данном случае длина распыливающего отверстия в насадке равнялась $l \approx 0,7$ мм, диаметр цилиндрического канала составлял $d = 0,5$ мм.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 показаны формы струй воды при истечении с линии насыщения через насадку с цилиндрическим каналом для разных значений температуры в сосуде высокого давления T_{0s} .

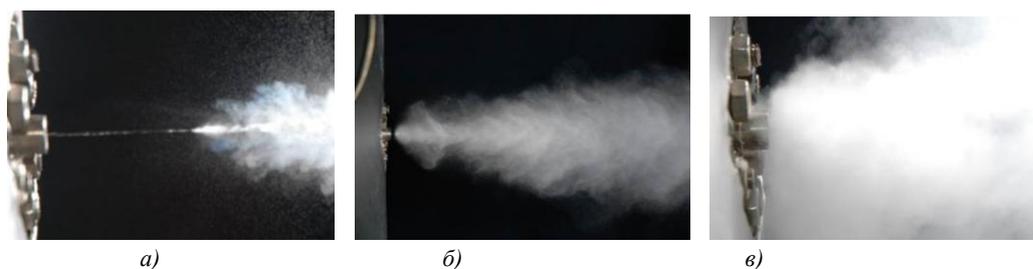


Рис. 3. Виды струй воды при истечении с линии насыщения:
а) $T_{0s} = 170^\circ\text{C}$; б) $T_{0s} = 182^\circ\text{C}$; в) $T_{0s} = 300^\circ\text{C}$

Из рис. 3,а видно, что струя вскипает за выходным срезом канала на некотором расстоянии в направлении движения потока, т.е. наблюдается некоторая задержка вскипания.

С увеличением степени перегрева воды возрастает число активированных центров кипения и область вскипания приближается к выходному срезу канала, и при температуре $T_{0s} = 180^\circ\text{C}$ струя приобретает форму, показанную на рис 3,б. Поток достаточно гомогенный, с гладкими внешними границами вблизи канала. Следует отметить, что при истечении воды в температурном интервале T_{0s} от 220 до 250°C обеспечивается тонкое диспергирование.

При температуре $T_{0s} = 300^\circ\text{C}$ вскипание происходит уже внутри канала, и на выходе наблюдается двухфазный поток с изрезанными границами (см. рис. 3,в).

Таким образом, рост температуры жидкости перед распыливающим отверстием постепенно снижает диаметр капель на выходе и повышает однородность их распределения по потоку, причем данная тенденция прослеживается только в определенном диапазоне температур. Процесс смесеобразования в этом случае улучшается за счет более равномерного перемешивания топлива с воздушной смесью в камере сгорания.

Результаты экспериментов указывают на то, что оперативным управлением степенью перегрева жидкости и геометрическими параметрами распыливающего отверстия насадки (форсунки) можно существенно менять форму струи и, тем самым, создавать такую ее конфигурацию, которая максимально соответствовала бы форме камеры сгорания двигателя и была бы оптимальной для данного режима работы поршневого двигателя. Кроме того, при распылении на основе вскипания можно путем надлежащего подбора степени

перегрева обеспечить необходимую корректировку формы струи распыла. В итоге применительно к поршневым двигателям эти мероприятия должны привести к повышению мощности ДВС, уменьшению удельного расхода топлива, снижению токсичности отработавших газов и повышению надежности конструктивных элементов, образующих камеру сгорания. После получения положительных результатов по распылу перегретой воды из насадки с одним каналом были проведены исследования для реальной форсунки дизельного двигателя.

В экспериментальную установку, описанную выше, была установлена форсунка Ф210-2-04 (0210.24.000.000-2.04) ТУ 24.06.2077-85 производства ОАО «Волгодизельаппарат». Диаметр канала в распылителе форсунки составлял 0,35 мм, количество каналов (распыливающих отверстий) – 8, угол развала – 145°. Начальные параметры в рабочей камере варьировались от температуры воды 21°C и давления в рабочей камере $P_{0s} = 1,2$ МПа (ненасыщенное состояние) до параметров линии насыщения воды при температуре 250°C и давления $P_{0s} = 4,0$ МПа. Результаты экспериментов, представленные на рис. 4, показали, что при распыле жидкости при параметрах линии насыщения вскипание происходит на активированных гетерогенных центрах вблизи выходного среза канала и приводит к постепенному расширению струи в направлении движения потока.

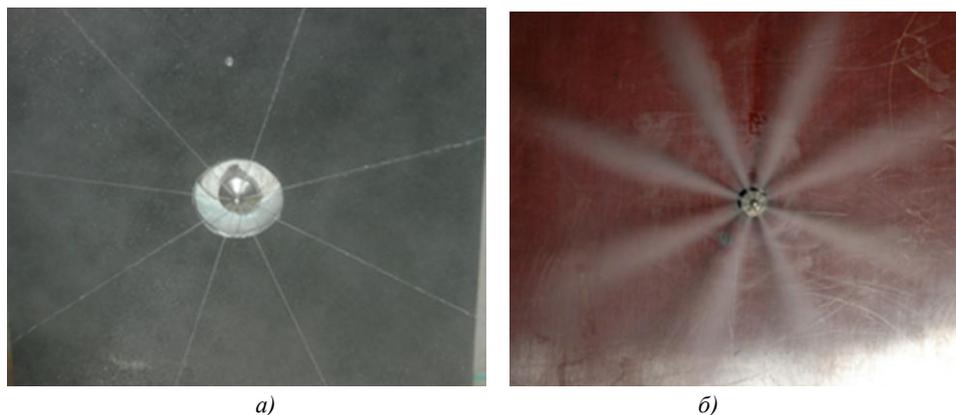


Рис. 4. Формы струй воды, истекающей через форсунку дизельного двигателя при различных начальных параметрах: а) начальная температура 21°C и давление 1,2 МПа; б) начальная температура $T_c = 250^\circ\text{C}$ и давление 4,0 МПа

Следует отметить, что в зависимости от степени перегрева происходили изменения формы струи распыливаемой жидкости аналогично с результатами истечения жидкости через один канал. В частности, перегрев жидкости способствовал снижению диаметра капель воды на выходе и повышал однородность их распределения по потоку; при этом угол раскрытия факела струй увеличивался.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности более эффективного распыливания топлива, о его почти мгновенном переходе в газовую фазу за счет эффекта взрывного вскипания. Это должно привести к ряду положительных эффектов:

– повышению мощности и надежности дизельного двигателя за счет отсутствия или снижения давления, развиваемого топливным насосом высокого давления в системе топливоподачи, в связи с чем должны уменьшиться затраты мощности двигателя на его привод и увеличиться ресурс двигателя;

– снижению удельного расхода топлива за счет более равномерного перемешивания с воздухом топлива по объему камеры сгорания и, соответственно, более полного его сгорания;

– снижению токсичности отработавших газов дизеля: за счет более равномерного распределения топлива по объему камеры сгорания, что приводит к более полному сгоранию, а также за счет сокращения времени на процесс смесеобразования и сгорания, что уменьшает количество образующихся оксидов азота NO_x и, соответственно, снижает количество вредных веществ в отработавших газах;

– повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания дизеля, за счет более равномерного распределения температуры по объему камеры сгорания, а соответственно, и более равномерному распределению температур в деталях, образующих камеру сгорания, что проявляется в снижении температурных напряжений в них, что приводит к повышению их надежности.

Топливная система поршневого ДВС с использованием эффекта взрывного вскипания

Для реализации рассматриваемого способа топливоподачи с использованием эффекта взрывного вскипания была разработана предполагаемая схема работы новой системы топливообеспечения дизеля, которая показана на рис. 5.

Схема работает следующим образом. Топливо из топливного бака 8 проходит через фильтр грубой очистки топлива 13 и далее закачивается топливоподкачивающим насосом в бойлеры для нагрева топлива 10, проходя перед этим через фильтр тонкой очистки топлива 12. Позиции 8, 13, 11 и 12 формируют контур низкого давления топлива.

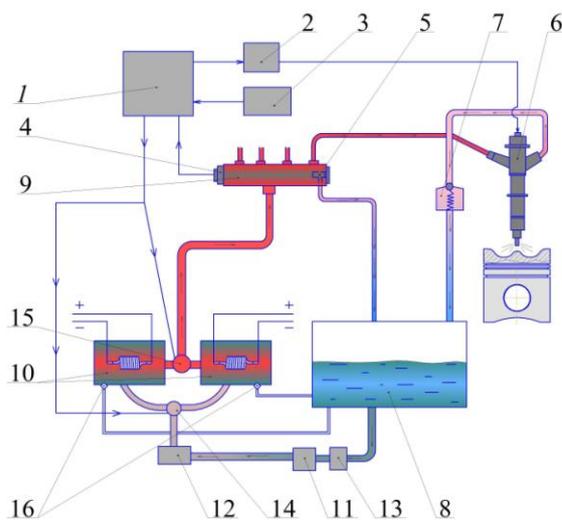


Рис. 5. Схема топливной системы дизеля с использованием эффекта взрывного вскипания:
1 – блок управления двигателем; 2 – усилитель форсунок; 3 – датчики; 4 – датчик давления топлива в рампе; 5 – ограничитель давления; 6 – пьезоэлектрическая форсунка; 7 – клапан обратный; 8 – топливный; 9 – рампа топливная; 10 – бойлер для нагрева топлива; 11 – насос топливоподкачивающий; 12 – фильтр тонкой очистки топлива; 13 – фильтр грубой очистки топлива; 14 – электромагнитный клапан-переключатель топливной магистрали низкого давления; 15 – электромагнитный клапан-переключатель топливной магистрали высокого давления; 16 – клапан сброса остаточного давления

В бойлерах 10 установлены ТЭНы, посредством которых топливо нагревается до необходимой температуры, контролируемой датчиком. Далее происходит перекрытие

электромагнитных клапанов 14 и 15 так, чтобы только один из бойлеров был соединен с топливной рампой 9 и одновременно был изолирован от контура низкого давления топлива.

Топливная рампа 9 аккумулирует перегретое в бойлере 10 топливо и сглаживает пульсации давления. В корпусе рампы вмонтированы датчик давления топлива 4 и ограничитель давления 5, которые служат для поддержания необходимых параметров топлива перед впрыском. Полость топливной рампы соединена трубопроводами высокого давления с пьезоэлектрическими форсунками 6, которые служат для подачи перегретого топлива в цилиндры двигателя. Форсунки управляются блоком управления двигателем 1 посредством электрического сигнала и усилителя форсунок 2.

Данная схема является лишь одним из возможных способов реализации топливоподачи с использованием эффекта взрывного вскипания. Так, например, вместо ТЭНов можно использовать теплоту выхлопных коллекторов двигателя. Возможно полностью отказаться от топливной рампы, использовать всего один бойлер-нагреватель или наоборот, применить отдельные бойлеры на каждом цилиндре.

Заключение

Таким образом, на основании рассмотренных данных можно сделать следующие основные выводы.

1. Представлены результаты исследования процесса взрывного вскипания применительно к топливной системе дизельного двигателя; показаны результаты распыла перегретой воды через цилиндрический канал и через форсунку реального дизеля, а также предложена схема реализации топливоподачи в дизеле с использованием эффекта взрывного вскипания.

2. Реализация предложенных систем топливоснабжения в поршневых двигателях внутреннего сгорания потенциально может привести к следующим положительным явлениям:

- повышению мощности (до 5–10% за счет отсутствия потерь мощности на привод ТНВД);
- повышению надежности элементов, образующих камеру сгорания и двигателя в целом (увеличению показателя безотказности на 3–5% за счет снижения теплонапряженности деталей и количества прецизионных пар трения);
- снижению удельного расхода топлива (до 2% за счет увеличения полноты сгорания топлива);
- снижению количества вредных веществ в отработавших газах на 10–15% (по предварительным оценкам выше уровня современных дизелей с системой *Common Rail* и применением систем фильтрации выхлопных газов).

Все вышеизложенное доказывает возможность решения актуальных задач современного двигателестроения в области экологии, надежности и топливной экономичности при использовании предлагаемого способа топливоподачи и смесеобразования в дизельных двигателях. При этом следует отметить, что рассматриваемая система топливоподачи для поршневых двигателей требует дополнительных расчетных и экспериментальных исследований с другими жидкостями (включая дизельное топливо) и более тщательной инженерной проработки для последующей реализации в промышленности.

Литература

1. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 144 с.
2. Григорьев М.А., Донецкий В.А. Обеспечение надежности двигателей. М.: Изд-во стандартов, 1978. 322 с.
3. Плотников Л.В. Анализ и оценка надежности двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 160 с.

4. Грехов Л.В., Денисов А.А., Старков Е.Е. Впрыскивание дизельного топлива под давлением до 400 МПа // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 8. С. 24–28.
5. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail. М.: МГТУ, 2000. 64 с.
6. Грехов Л.В., Габитов И.И., Негвора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливopодających систем дизелей. М.: Легион-Автодата, 2013. 292 с.
7. Ferrari A., Pizzo A. Fully predictive Common Rail fuel injection apparatus model and its application to global system dynamics analyses // International journal of engine research. 2017. Vol. 18, № 3. P. 273–290.
8. Русинов Р.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. М.: Судостроение, 1971. 224 с.
9. Иванов В.Н. О заклинивании прецизионных деталей насосов высокого давления // Электрическая и тепловозная тяга. 1964. № 12. С. 38–42.
10. Сутин Л.В., Долины В.Н. О влиянии некоторых факторов на надежность работы распылителей // Труды ЦНИДИ. 1966. Вып. 54. С. 13–18.
11. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость: монография. М.: Наука, 1972. 312 с.
12. Буланов Н.В. Взрывное вскипание диспергированных жидкостей. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. 232 с.
13. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании / Н.А. Мажейко, А.В. Решетников, К.А. Бусов, В.П. Коверда, А.А. Старостин, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 35–40.

Авторы публикации

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: tot@ustu.ru.

Кочев Николай Сергеевич – аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: kochev91@list.ru.

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

References

1. Gurvich I.B., Syrkin P.E., Chumak V.I. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' avtomobil'nykh dvigatelei. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Transport, 1994. 144 s.
2. Grigor'ev M.A., Donetskii V.A. Obespechenie nadezhnosti dvigatelei. M.: Izd-vo standartov, 1978. 322 s.
3. Plotnikov L.V. Analiz i otsenka nadezhnosti dvigatelei vnutrennego sgoraniya: uchebno-metodicheskoe posobie. Ekaterinburg: UrFU, 2016. 160 s.
4. Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov E.E. Vpryskivanie dizel'nogo topliva pod davleniem do 400 MPa // Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh, 2015. № 8. S. 24–28.
5. Grekhov L.V. Akkumulyatornye toplivnye sistemy dvigatelei vnutrennego sgoraniya tipa Common Rail. M.: MGTU, 2000. 64 s.
6. Grekhov L.V., Gabitov I.I., Negvora A.V. Konstruktsiya, raschet i tekhnicheskii servis

toplivopodayushchikh sistem dizelei. M.: Legion-Avtodata, 2013. 292 s.

7. Ferrari A. Fully predictive Common Rail fuel injection apparatus model and its application to global system dynamics analyses / A. Ferrari, P. Pizzo // International journal of engine research. 2017. Vol. 18, № 3. Rr. 273–290.

8. Rusinov R.V. Toplivnaya apparatura sudovykh dizelei. M.: Sudostroenie, 1971. 224 s.

9. Ivanov V.N. O zaklinivanii pretsizionnykh detalei nasosov vysokogo davleniya // Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga, 1964, № 12. S. 38–42.

10. Sutin L.V., Dolini V.N. O vliyaniy nekotorykh faktorov na nadezhnost' raboty raspylitelei // Trudy TsNIDI, 1966, vyp. 54. S. 13–18.

11. Skripov V.P. Metastabil'naya zhidkost': monografiya. M.: Nauka, 1972. 312 s.

12. Bulanov N.V. Vzryvnoe vskipanie dispergirovannykh zhidkoste. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2011. 232 s.

13. Vliyanie termicheskikh i geometricheskikh faktorov na raspyl zhidkosti pri vzryvnom vskipanii / N.A. Mazheiko, A.V. Reshetnikov, K.A. Busov, V.P. Koverda, A.A. Starostin, L.V. Plotnikov, B.P. Zhilkin, Yu.M. Brodov // Tyazheloe mashinostroenie, 2014, № 6. S. 35–40.

Authors of the publication

Boris P. Zhilkin – Dr. of Phys.-math. Sciences, Professor of the “Heat power and heat engineering” Department Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Yurii M. Brodov – Dr. of technical Sciences, head of the Department of turbines and engines Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Nikolaj S. Kочев – postgraduate student of the Heat power and heat engineering Department Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Leonid V. Plotnikov – candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of turbines and engines Ural Federal University the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Поступила в редакцию

08 ноября 2017 года.