

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОПУСКА ПОДАЧИ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

## STUDY OF A DEVICE FOR IMPLEMENTING DIESEL ENGINE FUEL SUPPLY SKIPPING

**Д.Д. ХАРИСОВ**, к.т.н.  
**Э.М. ГАЙСИН**, к.т.н.

Башкирский государственный аграрный университет,  
Уфа, Россия, gaisin@inbox.ru

**D.D. HARISOV**, PhD in Engineering  
**E.M. GAJSIN**, PhD in Engineering

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia,  
gaisin@inbox.ru

В статье рассматривается проблема повышения топливной экономичности дизельных двигателей на режимах малых нагрузок и холостых ходов методом отключения цилиндров. Метод является одним из эффективных способов повышения топливной экономичности на указанных режимах. Однако присущие ему недостатки не позволяют в полной мере получить экономию топлива. Представлен метод пропуска подач топлива, заключающийся в том, что при переходе дизельного двигателя на режимы малых нагрузок и холостых оборотов прекращается подача топлива не в одном и том же цилиндре, а во всех цилиндрах поочередно. Для реализации такого метода регулирования топливная система дизеля должна позволять пропускать отдельные цикловые подачи. Это возможно лишь при электронном управлении топливоподачей. Множество ныне эксплуатируемых дизельных двигателей оснащены электронно-управляемыми системами топливоподачи, однако из-за конструктивных особенностей не всегда целесообразно перенастраивать систему на работу с пропуском подачи топлива. В связи с этим наибольший интерес представляют электронно-управляемые устройства (клапаны), которые можно внедрить в штатную систему топливоподачи. Практический интерес представляют клапаны кольцевого типа, в которых функцию силового и запирающего элемента выполняет само разрезное кольцо, а гнездом для кольца служит цилиндрическая поверхность. Предложено устройство пропуска подачи топлива на основе электромагнитно-управляемого клапана кольцевого типа. Проведенные теоретические исследования позволили оптимизировать форму и размеры клапана, в частности, улучшить работоспособность при малом сечении кольца, уменьшить противодействующие силы и получить большую мощность электромагнита. Стендовые испытания показали работоспособность предлагаемого устройства при разных числах пропускаемых подач топлива.

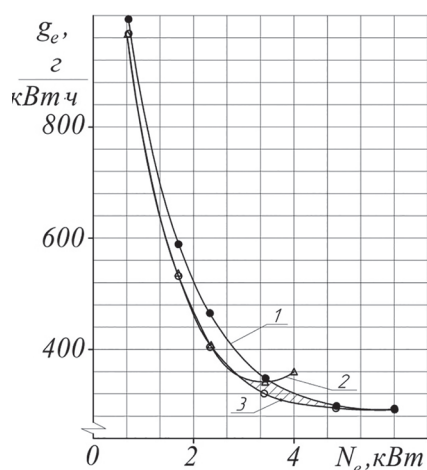
*Ключевые слова:* отключение цилиндров, пропуск подачи топлива, кольцевой клапан, электромагнит.

The article discusses the problem of increasing the fuel efficiency of diesel engines at low load and idle modes by turning off the cylinders. The method is one of the effective ways to increase fuel economy in these modes. But its inherent disadvantages do not allow to fully obtain fuel economy. The method of skipping fuel supply is presented, which consists in the fact that when the diesel engine switches to low load and idle modes, the fuel supply stops not in the same cylinder, but in all cylinders alternately. To implement this method of regulation, the diesel fuel system must allow the skipping of individual cycle feeds. This is only possible with electronic fuel control. Many currently operating diesel engines are equipped with electronically controlled fuel supply systems, however, due to design features, it is not always advisable to reconfigure the system to work with a fuel supply skipping. In this regard, the most interesting are electronically controlled devices (valves), which can be implemented in a standard fuel supply system. The practical interest have the ring-type valves, where the split ring itself performs the function of the power and locking element, and the cylindrical surface serves as a socket for the ring. A fuel flow skipping device based on an electromagnetic-controlled valve of the annular type is proposed. Theoretical studies have made it possible to optimize the shape and size of the valve, in particular, to improve performance with a small section of the ring, to reduce the opposing forces and to obtain a large power of the electromagnet. Bench tests showed the efficiency of the proposed device with different numbers of skipped fuel supplies.

*Keywords:* cylinder shutdown, fuel flow pass, ring valve, electromagnet.

## Введение

Эффективным способом повышения топливной экономичности дизельных двигателей на режимах малых нагрузок и холостых ходов является метод отключения части цилиндров [1, 2], который иногда называют методом изменения рабочего объема двигателя, подразумевая его изменение, когда в работе остается часть цилиндров [3]. Недостатками метода являются ступенчатое изменение удельного расхода топлива (рис. 1), возрастание неидентичности по цилиндрам тепловой напряженности основных деталей двигателя (длительное прекращение подачи топлива в одни и те же цилиндры приводят к его охлаждению), увеличение неравномерности вращения коленчатого вала и др. При работе с пропуском отдельных порций топлива указанные недостатки могут проявляться в значительно меньшей степени [4].



**Рис. 1.** Экспериментальные нагрузочные характеристики дизеля 2Ч105х120 с частотой вращения коленчатого вала 1100 мин<sup>-1</sup> при работе: 1 – на всех цилиндрах; 2 – на одном цилиндре; 3 – с пропуском порций топлива

## Цель исследования

Исследование и разработка устройства для реализации пропуска подачи топлива.

## Материалы и методы

Исследования проводились на топливном насосе высокого давления 4УТНИ. Теоретические исследования велись с использованием комплекса моделирования электромагнитных задач – Elcut.

## Результаты и обсуждение

Пропуск подачи топлива можно считать частным случаем метода отключения ци-

линдров. Суть метода заключается в том, что при переходе дизеля на режимы малых нагрузок и холостых оборотов прекращается подача топлива не в одном и том же цилиндре, а во всех цилиндрах поочередно. При этом удельный расход топлива меняется плавно и позволяет дополнительно получить экономию (заштрихованная зона на рис. 1).

Для реализации даны метода регулирования топливная система дизеля должна позволять пропускать отдельные цикловые подачи топлива. Это возможно лишь при электронном управлении топливоподачей.

Множество ныне эксплуатируемых дизельных двигателей оснащены электронно-управляемыми системами топливоподачи, однако из-за конструктивных особенностей не всегда целесообразно перенастраивать систему на работу с пропуском подачи топлива.

В связи с этим наибольший интерес представляют электронно-управляемые устройства (клапаны), которые можно внедрить в штатную систему топливоподачи [5, 6].

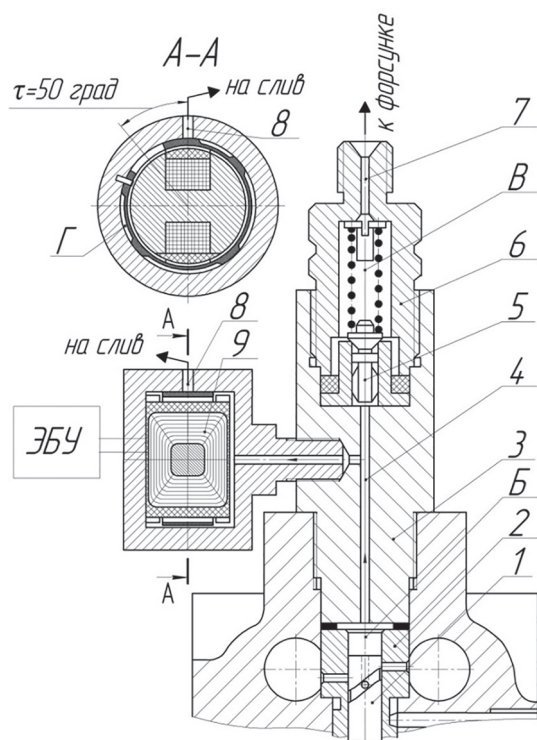
Практический интерес представляют клапаны кольцевого типа, в которых функцию силового и запирающего элемента выполняет само разрезное кольцо, а гнездом для кольца служит цилиндрическая поверхность [7–9].

На рис. 2 представлено разработанное устройство с кольцевым клапаном для работы с пропуском подачи топлива.

Устройство работает следующим образом. Для пропуска подачи топлива в цилиндр на обмотку электромагнита 9 до начала подачи топлива плунжером подается управляющее напряжение от ЭБУ. При этом кольцо открывает канал 8 и сливает топливо в линию низкого давления. При обесточивании обмотки электромагнита кольцо возвращается в исходное положение благодаря своей упругости.

Если на обмотку электромагнита напряжение не подано, то кольцо остается плотно прижатым к гнезду и не пропускает топливо на слив. При этом нагнетаемое топливо из полости Б поступает через нагнетательный клапан 5 к форсунке и впрыскивается в цилиндр.

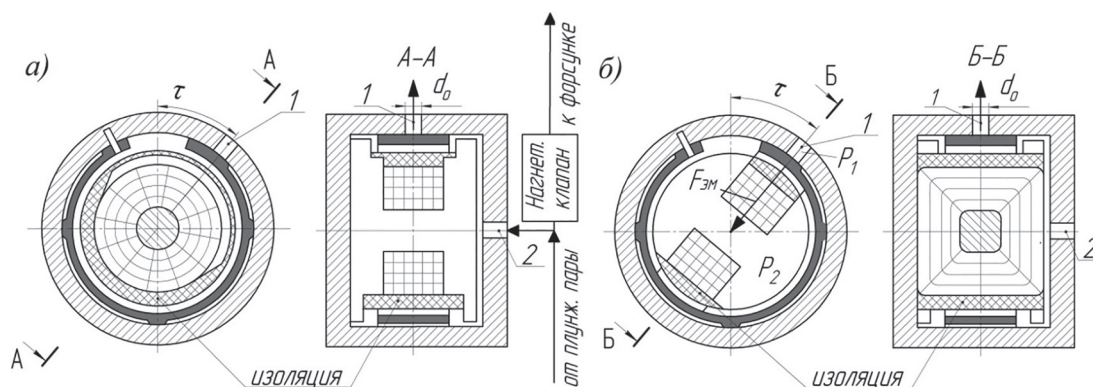
Поскольку клапан монтируется в линию высокого давления, к электромагниту предъявляются требования по надежности, быстродействию и развиваемой силе притяжения. Размеры электромагнита ограничиваются требованиями уменьшения объема внутриклапанной полости.



**Рис. 2. Схема секции насоса высокого давления с электронно-управляемым перепускным устройством с кольцевым клапаном:**

1 и 2 – плунжер насоса и его втулка; 3 – штуцер-переходник; 4, 7, 8 – каналы; 5 и 6 – клапан нагнетательный грибковый и его штуцер; 9 – электромагнит; Б – надплунжерное пространство; В – полость нагнетательного грибкового клапана; Г – полость кольцевого клапана; ЭБУ – электронный блок управления

На рис. 3 представлено два возможных варианта исполнения электромагнитов перепускного устройства, отличающихся расположением магнитных силовых линий.



**Рис. 3. Схемы электромагнитов перепускного устройства с магнитными силовыми линиями вдоль образующей кольца (а) и поперек нее (б):**

1 и 2 – каналы сливной и подводящий;  $P_1$  и  $P_2$  – давления топлива в канале 1 и во внутриклапанной полости;  $\tau$  – угол, определяющий положение сливного канала относительно середины зазора между кромками кольца;  $F_{эм}$  – сила притяжения электромагнита

Угол  $\tau$  определяет положение сливного канала относительно середины зазора между кромками кольца. При изменении этого угла будет меняться и противодействующие электромагниту силы. Например, при малых значениях угла можно избавиться от силы трения и значительно уменьшить силу давления топлива и силу упругости. Таким образом, угол  $\tau$  будет определять эффективность работы электромагнита.

С целью определения оптимального угла  $\tau$  расположения электромагнитов и сравнения их по развиваемой силе притяжения были проведены программы не расчеты с использованием комплекса моделирования электромагнитных задач Elcut. В расчетах использовалась модель магнитного нестационарного поля в декартовых координатах. Решалась оптимизационная осесимметричная задача при постоянном зазоре 0,4 мм между якорем (кольцом) и сердечником электромагнита без учета влияния противодействующих сил и вихревых токов в сердечниках.

На обмотку электромагнитов подавался импульс напряжения величиной от 6 до 36 В продолжительностью до  $t = 30$  мс при различных сечениях провода и количестве витков обмотки.

Сила притяжения  $F_{эм}$  оказалась максимальной при предполагаемом сечении медного провода 0,312 мм<sup>2</sup> с количеством витков 100 (суммарным активным сопротивлением  $R_a = 0,6$  Ом).

Зависимости  $F_{эм}$  от напряжения на обмотках электромагнитов и угла  $\tau$  изображены на рис. 4.

Как видно, по развиваемому усилию предпочтительным оказался электромагнит второ-

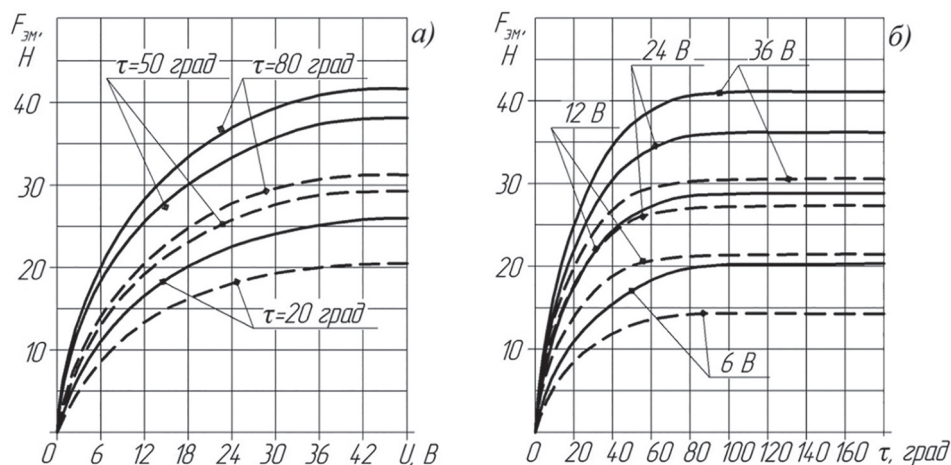


Рис. 4. Зависимости сил притяжения электромагнитов первого (штриховые линии) и второго (сплошные) вариантов от напряжения (а), подаваемого на их обмотки и угла  $\tau$  (б)

го варианта. Он развивал большую силу притяжения при любых задаваемых напряжениях и углах  $\tau$ .

Экспериментально сила притяжения электромагнитов, изготовленных с теми же размерами и параметрами обмотки, определялась при помощи рычажно-весового динамометра (рис. 5) с учетом противодействующих сил: силы давления топлива  $F_{дт}$  в полости клапана, упругости кольца  $F_{упр}$ , трения кромки кольца о поверхность гнезда  $F_{тр}$ , силы инерции  $F_i$ , гидравлического и магнитного залипаний  $F_{гм}$ , а также веса грузов  $F_{гр}$ . Во внутриклапанной полости поддерживалось постоянное давление топлива 0,2 МПа. Величина давления фиксировалась манометром.

Величина тока в обмотках электромагнитов определялась по падению напряжения

на шунте с помощью аналогово-цифрового преобразователя. Ток в обмотках составил 10, 20 и 60 А при подаче на них напряжений 6, 12 и 36 В, соответственно.

Подбором веса грузов  $F_{гр}$  определялись максимальные силы притяжения электромагнитов, необходимые для открытия сливного канала на 0,4 мм. Эксперименты проводились при различных напряжениях на обмотке электромагнитов и углах  $\tau$  от 0 до 180 град.

Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

С увеличением напряжения в обмотках электромагниты могли преодолеть больший вес грузов, т.е. сила их притяжения пропорционально возрастала (рис. 6, а), запас мощности увеличивался. Особенно у электромагнита второго варианта.

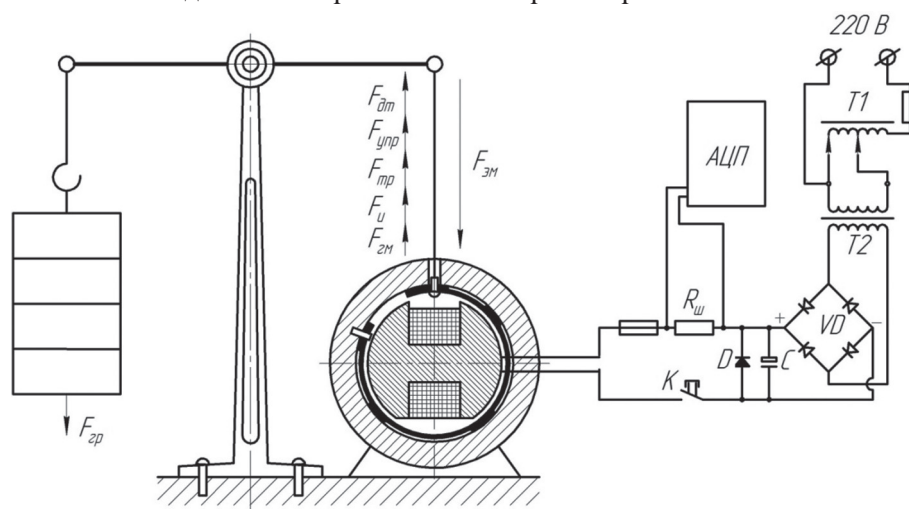


Рис. 5. Схема рычажно-весового динамометра и электрической части:

$T_1$  и  $T_2$  – регулируемый лабораторный автотрансформатор и понижающий трансформатор;  $VD$  – диодный мост;  $C$  – конденсатор;  $D$  – защитный диод;  $R_{ш}$  – шунт;  $K$  – ключ включения цепи



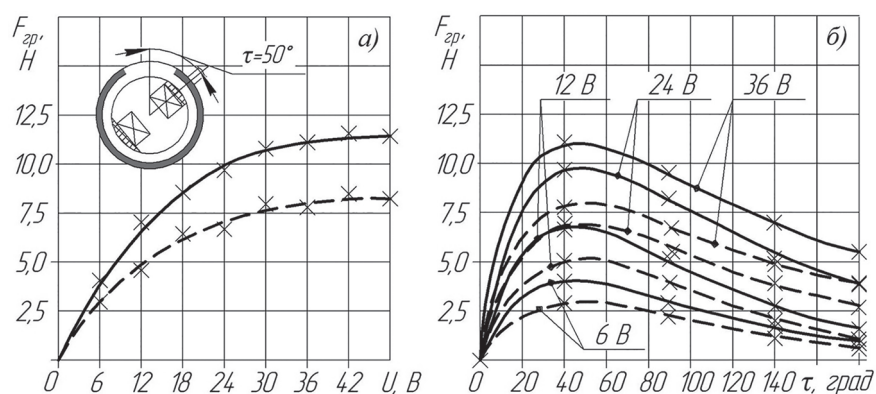


Рис. 6. Экспериментальные зависимости максимального веса грузов, приложенных к электромагнитам первого (штриховые кривые) и второго (сплошные) вариантов от напряжения, подаваемого на их обмотку при  $\tau = 50$  град (а) и различных углов  $\tau$  (б)

При изменении угла  $\tau$  от 0 до 180 град сила притяжения сначала возрастала аналогично расчетным данным (рис. 6, б), а затем уменьшалась. Причиной уменьшения является возрастание противодействующих сил со стороны кольца. При  $\tau \approx 40...60$  град перемещается только кромка кольца, исключается сила трения, уменьшаются силы давления топлива, упругости кольца и инерции. А при  $\tau \geq 60$  град перемещается вся свободная половина, увеличивая сначала силы давления топлива, инерции, затем силы упругости и трения.

Из сравнения экспериментальных графиков с расчетными рис. 4 следует, что значительная часть сил притяжения электромагнитов порядка, составляющая 70–75 %, затрачивается на преодоление сопротивления клапана и теряется из-за вихревых токов в сердечниках и нагрева обмотки.

Таким образом, для перепускного устройства целесообразным является использование электромагнита второго варианта с расположением его под указанным углом  $\tau = 40...60$  град.

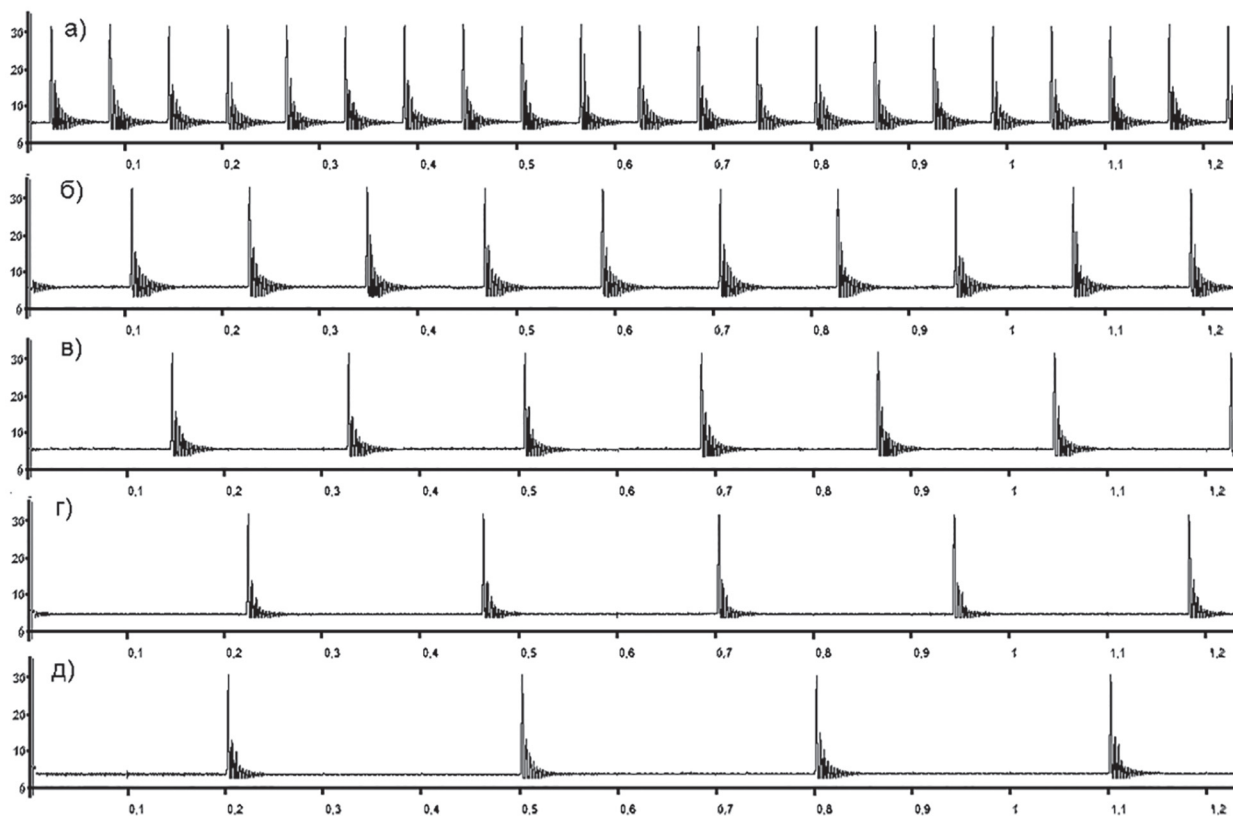


Рис. 7. Осциллограммы давления топлива у штуцера форсунки при реализации: а – всех подач; б – каждой второй подачи; в – каждой третьей; г – четвертой; д – пятой

На рис. 7 представлены осциллограммы давления топлива у штуцера форсунки секции насоса, оборудованной предлагаемым устройством пропуска подачи топлива. Как видно из данных, предлагаемое устройство позволяет пропускать различное количество подач топлива в цилиндр двигателя (каждая вторая, третья и т.д.) благодаря достаточной силе притяжения электромагнита, быстрдействию и надежности работы.

### Выводы

Полученные экспериментальные данные по определению сил притяжения электромагнитов выявили возможность оптимизации формы и расположения электромагнита, в частности, позволили улучшить работоспособность клапана при малом сечении кольца (якоря), уменьшить противодействующие силы (исключив влияние сил трения) и получить большую мощность электромагнита.

### Литература

1. Патрахальцев Н.Н., Страшнов С.В., Мельник И.С., Корнев Б.А. Изменение числа работающих цилиндров дизеля – вариант повышения экономичности его режимов малых нагрузок // Автомобильная промышленность. 2012. № 2. С. 11–13.
2. Гайсин Э.М., Рожков С.А. Повышение эффективности работы дизельных двигателей при регулировании нагрузки отключением цилиндров // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 2 (118). С. 73–76.
3. Аношина Т.С. Повышение экономических и экологических качеств транспортного дизеля при работе на режимах малых нагрузок и холостых ходов: дис ... канд. техн. наук. М., 2014. 121 с.
4. Гайсин Э.М. Повышение топливной экономичности тракторных дизелей регулированием режимов их работы пропуском подачи топлива: дис ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург – Пушкин, 2007. 129 с.
5. Патрахальцев Н.Н., Олесов И.Ю., Камышников О.В. и др. Авт. св. 1694955 РФ. Топливная система дизеля с отключением цилиндров. БИ. 1991. № 44.
6. Харисов Д.Д., Баширов Р.М. Баширов Р.М., Галиуллин Р.Р., Гайсин Э.М. Топливная система распределительного типа для автотракторных дизелей с регулированием режимов работы отключением подачи топлива: патент на изобретение № 2301903 от 27.06.2007 г.
7. Клапаны топливных систем двигателей внутреннего сгорания. Уфа: Гилем, 2012. 112 с.
8. Баширов Р.М., Харисов Д.Д. Кольцевые клапаны для топливных систем двигателей внутреннего сгорания // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2013. № 1 (25). С. 11–13.

9. Баширов Р.М., Харисов Р.М. Способ изготовления разрезных колец кольцевых клапанов: патент на изобретение № 2506322 от 23.07.2012 г.

### References

1. Patrahalt'cev N.N., Strashnov S.V., Mel'nik I.S., Kornev B.A. Changing the number of working diesel cylinders as an option to increase the efficiency of its low-load modes. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2012. No 2, pp. 11–13 (in Russ.).
2. Gajsin E.M., Rozhkov S.A. Improving the efficiency of diesel engines when regulating the load by turning off the cylinders. *Energoberezhenie i Vodopodgotovka*. 2019. No 2 (118), pp. 73–76 (in Russ.).
3. Anoshina T.S. Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh kachestv transportnogo dizelya pri rabote na rezhimakh malyh nagruzok i holostykh hodov: dis....kand. tekhn. nauk [Improving the economic and environmental qualities of a transport diesel engine when operating at low load and idle modes: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Moscow, 2014. 121 p.
4. Gajsin E.M. Povyshenie toplivnoj ekonomichnosti traktornykh dizelej regulirovaniem rezhimov ih raboty propuskom podachi topliva: dis.... kand. tekhn. nauk [Improving the fuel economy of tractor diesels by regulating their operation modes by skipping fuel supply: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]. Sankt-Peterburg-Pushkin, 2007. 129 p.
5. Patrahalt'cev N.N., Olesov I.YU., Kamyshnikov O.V. i dr. Avt. sv. 1694955 RF. Toplivnaya sistema dizelya s ot-klyucheniem cilindrov [Cylinder shutdown diesel system]. BI. 1991. No 44.
6. Harisov D.D., Bashirov R.M. Bashirov R.M., Galiullin R.R., Gajsin E.M. Patent na izobretenie No 2301903 ot 27.06.2007 g. Toplivnaya sistema raspredelitel'nogo tipa dlya avtotraktornykh dizelej s regulirovaniem rezhimov raboty ot-klyucheniem podach topliva [Distribution type fuel system for automotive diesel engines with regulation of operating modes by switching off the fuel supply].
7. Klapanyy toplivnykh sistem dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Valves for fuel systems of internal combustion engines]. Ufa: Gilem Publ., 2012. 112 p.
8. Bashirov R.M., Harisov D.D. Ring valves for fuel systems of internal combustion engines. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2013. No 1 (25), pp. 11–13 (in Russ.).
9. Bashirov R.M., Harisov R.M. Patent na izobretenie No 2506322 ot 23.07.2012 g. Sposob izgotovleniya razreznykh kolec kol'cevykh klapanov [A method of manufacturing split rings of annular valves].