

# Энергетика и электротехника

УДК 621.43.05

## Улучшение экологических показателей среднеоборотного дизельного двигателя путем применения трехфазной подачи топлива

В.А. Рыжов<sup>1</sup>, М.Г. Шатров<sup>2</sup>, В.Е. Ионин<sup>1,2,3</sup>, А.А. Варшавский<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

<sup>3</sup> ООО «ИЦД ТМХ»

<sup>4</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Improving ecological performance of a medium-speed diesel engine by introducing the three-phase fuel supply

V.A. Ryzhov<sup>1</sup>, M.G. Shatrov<sup>2</sup>, V.E. Ionin<sup>1,2,3</sup>, A.A. Varshavsky<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> Kolomna Institute, Branch of the Moscow Polytechnic University

<sup>2</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

<sup>3</sup> LLC ICD TMH

<sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University

В связи с возросшими требованиями к защите окружающей среды поиск приемлемого компромиссного решения, направленного на снижение вредных выбросов от двигателей внутреннего сгорания при минимальном уменьшении их мощности и увеличении расхода топлива, становится актуальной задачей. Мероприятия по сокращению выбросов монооксида углерода и оксидов азота являются разнонаправленными. Предложено формировать рабочий процесс среднеоборотного дизельного двигателя по мере возрастания мощности последовательно однофазным, ступенчатым, двух- и трехфазным импульсом впрыска топлива. По сравнению с однофазной подачей трехфазный впрыск топлива за счет уменьшения максимальной температуры цикла и более полного окисления продуктов сгорания позволяет снизить при номинальном и близких к нему режимах работы дизельного двигателя выбросы оксидов азота на 30 %, монооксида углерода на 70 %, углеводородов на 40 % и дымности на 10 % при незначительном увеличении расхода топлива (на 0,5 %).

EDN: HCEHAZ, <https://elibrary/hcehaz>

**Ключевые слова:** среднеоборотный дизель, плунжерная пара, топливный насос высокого давления, оксид азота, монооксид углерода, трехфазная подача топлива

In connection with increased requirements to the environmental protection, searching for an acceptable compromise solution aimed at reducing harmful emissions from the internal combustion engine with minimal decrease in its power and an increase in the fuel consumption becomes an urgent task. Measures to reduce carbon monoxide and nitrogen oxides are multidirectional. The paper proposes to form the working process of a medium-speed diesel engine as power increases successively with a single-phase stepped, two- and three-phase

fuel injection pulses. Reducing the cycle maximum temperature and more complete oxidation of the combustion products makes it possible to lower the nitrogen oxide emissions by 30%, carbon monoxide by 70%, hydrocarbons by 40% and smoke emissions by 10% in the nominal and close operating modes of a diesel engine with insignificant deterioration in the fuel consumption (by 0.5%) compared to the single-phase supply.

EDN: HCEHAZ, <https://elibrary/hcehaz>

**Keywords:** medium-speed diesel engine, plunger pair, high-pressure fuel pump, nitrogen oxide, carbon monoxide, three-phase fuel supply

Ужесточение требований к защите окружающей среды обуславливает необходимость снижения вредных выбросов с отработавшими газами (ОГ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) различных транспортных средств. Это имеет большое значение, так как мероприятия по снижению выбросов приводят к росту стоимости ДВС и ухудшению их энергетических и экономических показателей.

Для среднеоборотных дизельных двигателей (далее СОД) разработаны специальные мероприятия по сокращению содержания токсичных компонентов в ОГ, указанные на рис. 1. Однако эти мероприятия имеют как преимущества, обеспечивающие улучшение экологических показателей, так и недостатки, обуславливающие негативное влияние на энергетические и/или экономические показатели СОД.

Цель работы — поиск приемлемого компромиссного решения, направленного на сни-

жение вредных выбросов СОД при минимальном снижении мощности и увеличении расхода топлива.

**Анализ целесообразности применения трехфазного впрыска топлива в СОД.** Анализ результатов, полученных специалистами АО «Коломенский завод» при исследовании рабочего процесса СОД размерного ряда Д49 (ЧН26/26), показал, что при частичных нагрузках в общем составе токсичных компонентов ОГ преобладают выбросы монооксида углерода (СО), а в номинальном и близких к нему режимах — оксидов азота (NO<sub>x</sub>). Мероприятия по их снижению являются разнонаправленными.

Выбросы оксидов азота наиболее эффективно сокращаются при снижении максимальных и локальных температур цикла, а выбросы монооксида углерода, наоборот, — при увеличении общей температуры цикла. Кроме того,

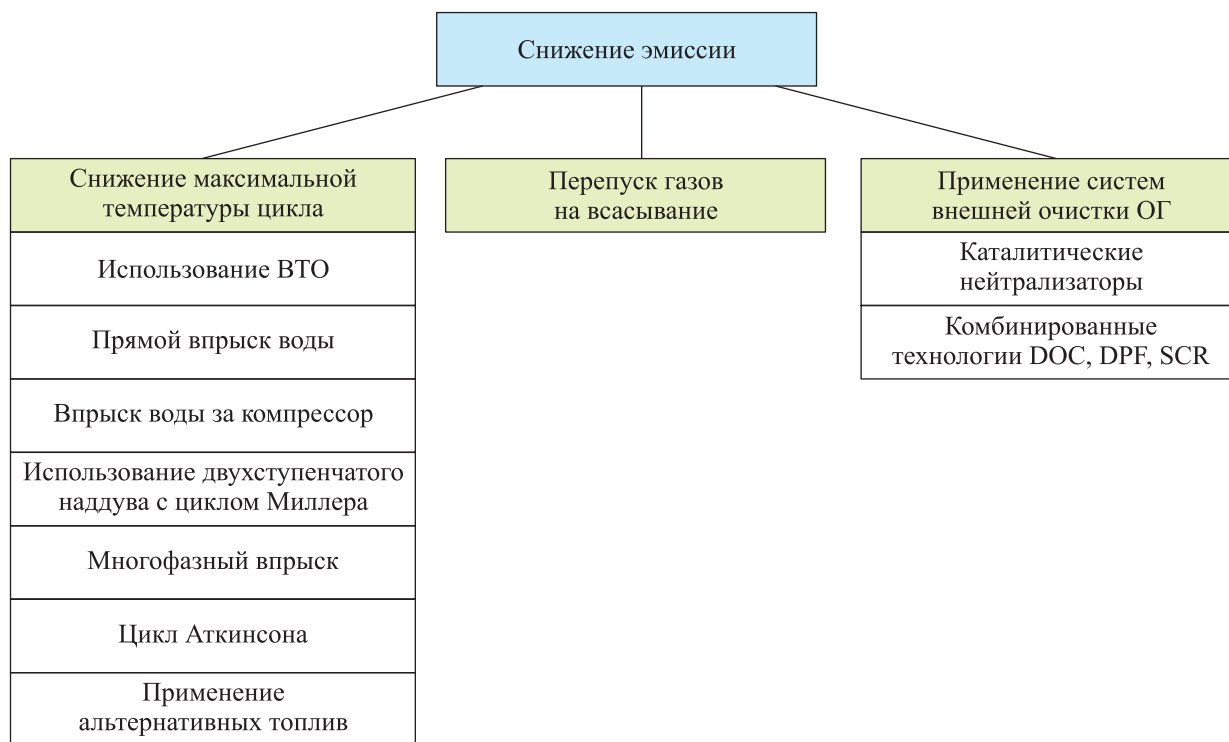


Рис. 1. Структурная схема мероприятий по снижению вредных выбросов СОД

уменьшение температуры цикла приводит к ухудшению индикаторного коэффициента полезного действия (КПД) и, следовательно, к повышенному расходу топлива. Для исключения этого явления необходимо корректировать фазу тепловыделения при одновременном уменьшении скорости нарастания давления в цилиндре [1–3].

Исходя из изложенного, многофазный впрыск топлива и комплексное управление процессом его подачи в цилиндр является эффективным решением, позволяющим достичь желаемого результата по ограничению токсических выбросов с ОГ при приемлемых энергетических и экономических показателях СОД.

Экспериментальные данные, полученные специалистами АО «Коломенский завод», подтверждают, что наиболее эффективным способом управления законом тепловыделения является организация работы СОД при одно-, двух- и трехфазном впрыске топлива в цилиндр с одновременной корректировкой угла опережения впрыска топлива при переходе от одного закона подачи к другому.

При проектировании, испытаниях, экспериментальных и расчетных исследованиях СОД 12Д49М мощностью  $P_e = 2200$  кВт и частотой вращения коленчатого вала  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> установлено, что для обеспечения наилучших показателей, удовлетворяющих экологическим нормам при минимальном увеличении расхода топлива, рабочий процесс должен быть организован следующим образом [1–3]:

1) в начале такта сжатия необходимо понизить температуру воздуха в цилиндре;

2) ограничить поступление топлива до верхней мертвой точки (ВМТ);

3) количество топлива, впрыскиваемого в первой фазе, и интервал между первой и второй фазами должны быть подобраны так, чтобы подача топлива во второй фазе осуществлялась в горящую топливно-воздушную смесь;

4) в основной фазе впрыска топливо должно начинать подаваться с большой интенсивностью после прохождения поршнем ВМТ, а заканчиваться в диапазоне 20...30° поворота коленчатого вала (ПКВ) за ВМТ в зависимости от цикловой подачи;

5) начало периода максимальной скорости сгорания топлива должно совпадать с началом интенсивного движения поршня к нижней мертвой точке, т. е. после 10...15° ПКВ за ВМТ, когда работа расширения газа максимально

компенсирует прирост энергии от сгорания топлива, вследствие чего снижается рост максимальной температуры газов в цилиндре СОД;

б) процесс сгорания должен заканчиваться не позднее 40...60° ПКВ за ВМТ в зависимости от требуемой цикловой подачи.

Предложенную организацию рабочего процесса можно выполнить разными способами: в первом пункте — применить цикл Миллера (или повысить эффективность охладителя наддувочного воздуха), во втором–четвертом — использовать ступенчатую, двух- и трехфазную подачу топлива в цилиндр с реализацией гибкого управления формой импульса давления впрыска, в пятом — повысить степень сжатия и уменьшить угол опережения впрыска топлива, в шестом — увеличить давление впрыска в конечной фазе.

При проектировании тепловозного форсированного СОД 12Д49М с цилиндровой мощностью  $P_{ц} = 200$  кВт на АО «Коломенский завод» проведены экспериментальные исследования организации способа его рабочего процесса по трем вариантам впрыска топлива в цилиндр в режиме номинальной мощности: 1) при однофазном впрыске; 2) при двухфазном впрыске с 15%-ной (относительно полного значения) подачей топлива в первой пилотной фазе; 3) при двухфазном впрыске с 90%-ной подачей топлива в первой фазе и 10%-ной во второй.

Фазовые положения характеристик впрыска топлива (давлений впрыска  $p_1, p_2, p_3$ ) и тепловыделения (коэффициентов активного выделения теплоты  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  и скоростей тепловыделения  $d\chi_1/d\varphi, d\chi_2/d\varphi_2, d\chi_3/d\varphi$ ) для описанных вариантов подачи топлива в цилиндр приведены на рис. 2. Здесь  $\varphi$  — угол ПКВ, а индексы «1», «2» и «3» соответствуют первому, второму и третьему вариантам впрыска топлива в цилиндр.

Как видно из рис. 2, при двухфазной подаче топлива по второму (б, д) и третьему (в, е) вариантам максимальное давление впрыска ниже на величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , а максимальная скорость тепловыделения меньше соответственно на величины  $\delta_3$  и  $\delta_4$ , чем при однофазной подаче топлива по первому варианту (а, з). Это связано с тем, что в основной фазе происходит впрыск только части цикловой подачи, вследствие чего эти параметры снижаются.

Таким образом, путем оптимизации угла опережения впрыска топлива  $\varphi_{оп}$  при совмеще-

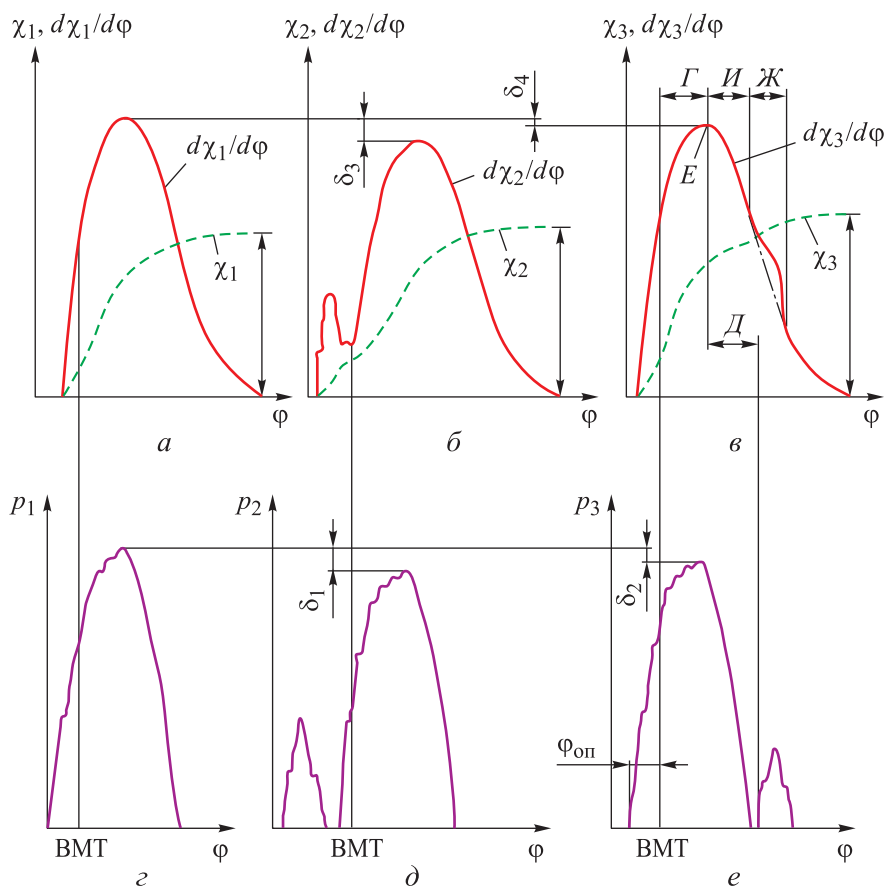


Рис. 2. Фазовые положения характеристик тепловыделения (а–в) и давлений впрыска топлива (з–е) СОД 12Д49М для первого (а, з), второго (б, д) и третьего (в, е) вариантов подачи топлива в цилиндр

нии максимальной скорости движения поршня с максимальной скоростью тепловыделения за счет уменьшения максимальной температуры цикла можно добиться снижения выбросов оксидов азота [1].

При организации рабочего процесса по третьему варианту при 90%-ной подаче топлива в первой фазе и 10%-ной во второй, а также при условии соответствующей оптимизации угла опережения впрыска топлива можно добиться такой динамики процесса сгорания, при которой максимальная скорость сгорания достигается в фазе *E*, смещенной относительно ВМТ в направлении вращения коленчатого вала на угол  $\Gamma$ , равный 15...18°.

После смещения за фазу *E* на угол  $\Delta$ , равный 6...8° ПКВ, осуществляется впрыск второй порции топлива, составляющий 8...10 % общей цикловой подачи. Гомогенизирующий эффект этой порции топлива, введенной в процесс горения, приводит к относительной активизации процессов окисления в конечной фазе сгорания (участок *Ж*, смещенный относительно фазы *E* в

направлении вращения коленчатого вала на угол *И*, равный 8...10°). То есть происходит более полное окисление продуктов сгорания, что приводит к снижению выбросов с ОГ монооксида углерода, углеводородов (СН) и твердых частиц [4].

На основании изложенного можно сделать вывод, что организация рабочего процесса по второму варианту впрыска топлива приводит к уменьшению выбросов с ОГ оксидов азота, а организация по третьему варианту — выбросов монооксида углерода, углеводородов и твердых частиц [1–3].

Использование комбинации этих вариантов, т. е. осуществление трехфазной подачи топлива, по сравнению с другими способами улучшения экологических показателей ДВС позволяет добиться существенного снижения  $NO_x$ , CO, СН и твердых частиц с минимальным увеличением расхода топлива. Это подтверждают [1–3] результаты испытаний СОД 12Д49М с организацией различных вариантов впрыска топлива (см. таблицу).

### Результаты испытаний СОД 12Д49М с организацией различных вариантов впрыска топлива

Показатель	Вариант впрыска топлива			
	первый	второй	третий	трехфазный
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	195,5	205,8	195,4	196,5
Содержание в ОГ, г/(кВт·ч):				
оксидов азота	9,71	6,80	7,10	6,80
монооксида углерода	5,12	4,89	1,36	1,50
углеводородов	0,85	0,71	0,62	0,51
Дымовое число, FSN ед.	0,20	0,60	0,16	0,18

Из таблицы следует, что при трехфазном впрыске топлива выбросы оксидов азота становятся меньше, чем при однофазном на 30 %, монооксида углерода — на 70 %, углеводородов — на 40 %, дымности — на 10 %, а расход топлива увеличивается на 0,5 %.

На основании изложенного можно заключить, что использование в СОД трехфазной подачи топлива обеспечивает эффективное снижение оксидов азота, монооксида углерода, углеводородов и твердых частиц при незначительном ухудшении экономичности в номинальном и близких к нему режимах работы СОД.

**Способ осуществления трехфазного впрыска топлива.** Одним из наиболее перспективных способов многофазной подачи топлива является применение аккумуляторных систем топливоподачи [5].

Топливные системы аккумуляторного типа обычно состоят из насоса, нагнетающего топливо в аккумулятор, специального распределителя и форсунки. Их принципиальное отличие от систем непосредственного действия заключается в том, что топливо поступает в камеру сгорания ДВС не непосредственно от насоса высокого давления, а из аккумулятора, в котором поддерживается необходимое давление [6, 7].

Аккумуляторные системы обладают самыми широкими возможностями для оптимизации рабочего процесса, такими как повышенное давление впрыска топлива и использование электронного управления, обеспечивающего не только оптимальное регулирование цикловой подачи, но и гибкое управление углом опережения впрыска топлива [8], что положительно влияет как на экологические показатели, так и на экономические.

Однако использование аккумуляторных систем в СОД является неприемлемым по следующим причинам [9, 10]:

- испытания на АО «Коломенский завод» показали, что время пуска СОД гораздо больше, чем у дизельного двигателя с гидромеханической системой подачи топлива, так как для крупногабаритного СОД нужен большой объем аккумулятора, иначе из-за большой подачи будут происходить отрицательные импульсы (провалы) давления в аккумуляторе [11];

- низкая надежность системы и большие габаритные размеры вследствие большого количества емкостей, топливопроводов, датчиков и др. [12, 13];

- невозможность мгновенного набора мощности, так как мгновенный расход топлива приводит к снижению давления в аккумуляторе [14]; поскольку давление падает, цикловая подача снижается до прежнего уровня, вследствие чего происходит увеличение продолжительности набора нагрузки до момента, пока давление в аккумуляторе вновь не восстановится, что в итоге вызывает дымление СОД.

Исходя из этого, рассмотрим возможность осуществления многофазного впрыска топлива с использованием традиционной гидромеханической топливной системы на примере СОД 12Д49М.

Магистраль высокого давления топливной системы СОД 12Д49М индивидуальна для каждого цилиндра и состоит из гидромеханического топливного насоса высокого давления (ТНВД) с плунжером-золотником (рис. 3), топливопровода высокого давления и гидромеханической форсунки (рис. 4) [15].

Анализ возможных технических решений топливной системы ДВС, обеспечивающей процесс сгорания при организации трехфазной подачи топлива в камеру сгорания, позволил предложить оригинальную модифицированную плунжерную пару ТНВД золотникового типа гидромеханической топливной системы [16].

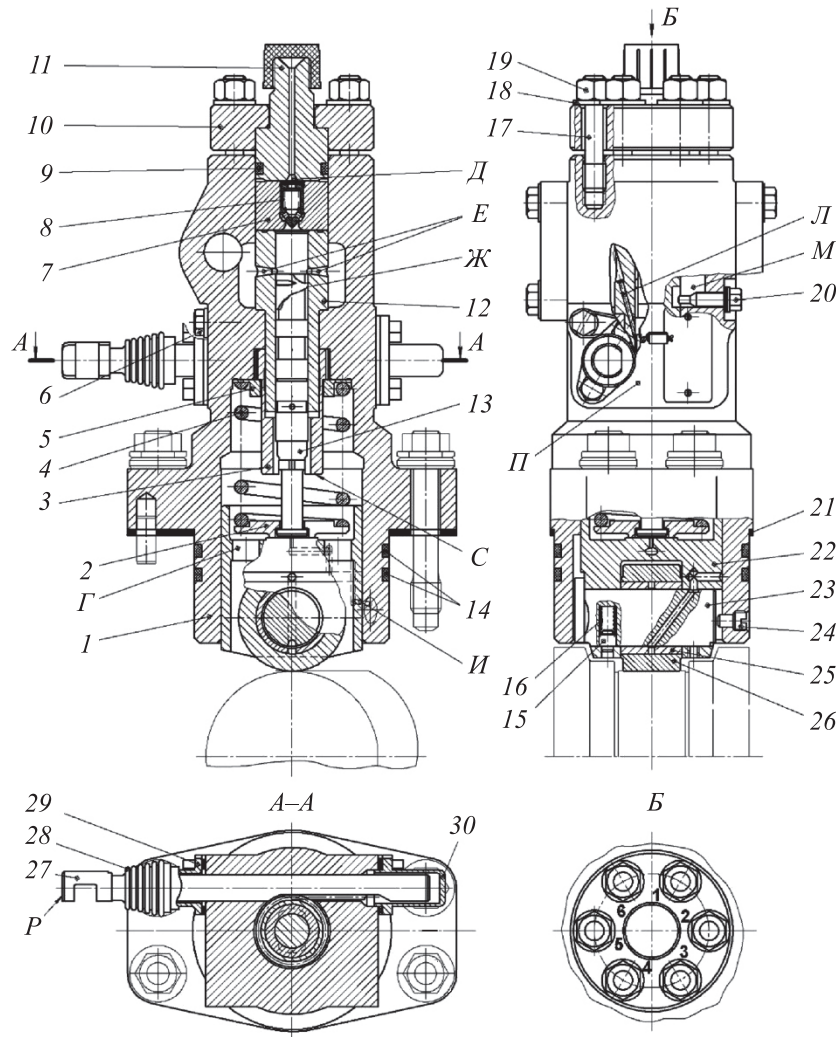


Рис. 3. Конструктивная схема ТНВД:

- 1 — корпус насоса; 2 и 5 — нижняя и верхняя тарелки; 3 — зубчатый венец; 4, 6 — болты;  
 7 — корпус нагнетательного клапана; 8 — клапан; 9, 14 — уплотнительные кольца;  
 10, 29 — фланцы; 11 — штуцер; 12 — втулка плунжера; 13 — плунжер; 15 — фиксатор;  
 16 — пружины; 17 — шпильки; 18 — шайбы; 19 — гайки; 20 — винт; 21 — регулировочные прокладки;  
 22 — корпус толкателя; 23 — ось ролика; 24 — стопорный винт; 25 — втулка; 26 — ролик;  
 27 — рейка; 28 — колпак; 30 — крышка; Г — отверстие для слива масла;  
 Д — полость высокого давления; Е — отверстие для подвода и отвода топлива;  
 Ж — отсечные кромки; И — отверстие для подвода масла к толкателю; Л — дренажное отверстие;  
 М — полость низкого давления; П — поверхность маркировки толщины прокладок; Р — торец рейки

На основе предложенного технического решения с помощью программного комплекса Autodesk Inventor PRO спроектирована трехмерная модель такого плунжера, который по мере увеличения мощности последовательно осуществляет однофазный, ступенчатый и двухфазный импульс впрыска (рис. 5) [10].

Предлагаемая топливная система позволяет снизить суммарные выбросы NO<sub>x</sub> и СО во всем диапазоне рабочих режимов СОД путем формирования по мере увеличения мощности однофазного, ступенчатого и двухфазного импульсов впрыска за счет специально спроекти-

рованных кромок плунжера и отсечного канала (рис. 6) [16].

Предложенная конструкция ТНВД позволяет осуществлять однофазный, ступенчатый и двухфазный впрыск топлива при следующих режимах:

- при нагрузке до 0,50 номинального значения осуществляется однофазный впрыск, так как специальный паз, расположенный перпендикулярно оси плунжера, не пересекает отсечные отверстия его втулки;
- при нагрузке 0,50...0,85 номинального значения реализуется однофазный двухступенча-

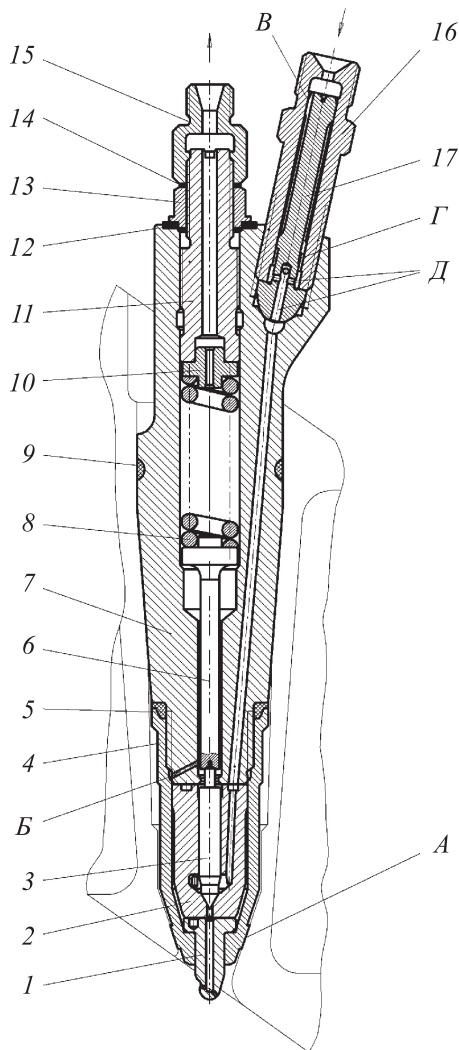


Рис. 4. Конструктивная схема форсунки:  
 1 — сопловой наконечник распылителя; 2 и 3 — корпус и игла распылителя; 4 — колпак; 5 — уплотнительное кольцо между корпусом форсунки и колпаком; 6 и 7 — штанга и корпус форсунки; 8 — пружина; 9 — уплотнительное кольцо между форсункой и крышкой цилиндра; 10 — тарелка; 11 — регулировочный винт; 12, 14 — медные прокладки; 13 — гайка; 15 — штуцер; 16 — корпус фильтра; 17 — стержень; А — конусная поверхность; В — канал отвода просочившегося топлива; В, Г — пазы; Д — отверстие прохода топлива

тый впрыск топлива, причем с ростом мощности амплитуда первой ступени уменьшается; благодаря ступенчатым винтообразным верхней и нижней кромкам плунжера одновременно с изменением формы подачи топлива происходит резкое увеличение угла опережения впрыска, что компенсирует снижение индикаторного КПД, которое было бы неизбежным, так как прирост продолжительности впрыска превалирует над приростом цикловой подачи вследствие появления импульса ступенчатой формы;

• при номинальном и близких к нему режимах работы СОД происходит двухфазная подача топлива, осуществляемая за счет паузы в процессе подачи, которая возникает из-за пересечения самой широкой части специального клиновидного паза отсечных отверстий втулки плунжера; протяженность этого паза подбирают так, чтобы двухфазная подача выполнялась в режимах 0,85...1,00 номинальной мощности.

Третью фазу впрыска топлива в цилиндр предложено осуществлять подвпрыском — дополнительной подачей небольшой порции топлива, происходящей после основного впрыска (впрыска топлива во второй фазе) в цилиндр [10]. Это явление принято считать вредным, так как зачастую оно приводит к снижению экономичности, повышению дымности ОГ, коксованию распылителя форсунки и дополнительным термическим нагрузкам [6, 17].

Однако при должной оптимизации топливной системы путем установки топливопровода высокого давления определенного диаметра и длины [7] можно обеспечить подачу в процесс горения такой порции топлива, гомогенизирующий эффект которой, оказываемый физическим воздействием факелов топлива на продук-

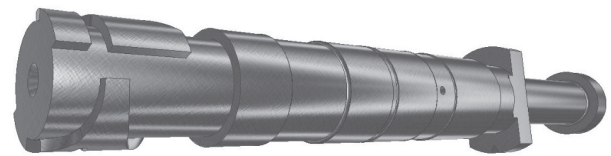


Рис. 5. Трехмерная модель плунжера, который по мере увеличения мощности последовательно осуществляет однофазный, ступенчатый и двухфазный импульс впрыска

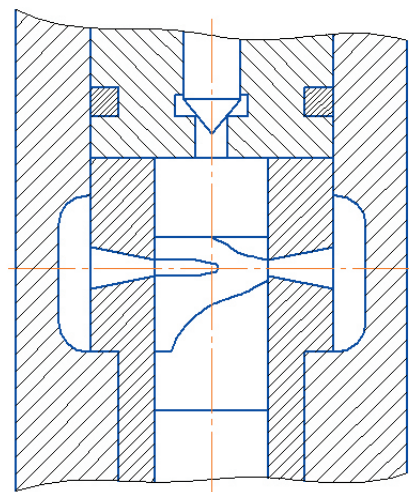


Рис. 6. Схема плунжера для трехфазной подачи топлива

ты сгорания, приведет к относительной активизации процессов окисления в конечной фазе сгорания [1]. Конечным результатом этого будет более полное окисление продуктов сгорания, вследствие чего снизится выброс в ОГ монооксида углерода, углеводородов и твердых частиц.

## Выводы

1. Анализ результатов исследования показал, что по мере увеличения мощности СОД его рабочий процесс можно формировать последовательно однофазным, ступенчатым, двух- и трехфазным импульсом впрыска. Использование трехфазной подачи топлива вместо однофазной при работе СОД при номинальном и близких к нему режимах обеспечивает сниже-

ние выбросов оксидов азота на 30 %, монооксида углерода на 70 %, углеводородов на 40 % и дымности на 10 % при незначительном увеличении (на 0,5 %) расхода топлива. Предлагаемый способ подачи топлива является одним из самых эффективных в плане поиска компромисса между необходимостью снижения вредных выбросов без существенного ухудшения экономических и энергетических показателей.

2. Дальнейшие исследования предполагают анализ возможности применения многофазной подачи топлива и управления цикловой подачей путем перепуска топлива электромагнитным клапаном, установленным в ТНВД. Реализация такой топливной системы более перспективна для СОД, так как позволяет управлять опережением впрыска и достичь более высокой надежности ввиду отсутствия кромок у плунжера.

## Литература

- [1] Рыжов В.А. *Совершенствование характеристик форсированных среднеоборотных двигателей двойного назначения средствами топливоподачи и воздухообеспечения*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 325 с.
- [2] Никитин Е.А., Улановский Э.А., Рыжов В.А. *Способ работы двигателя внутреннего сгорания*. Патент РФ 2164300. Заявл. 23.02.1999, опубл. 20.03.2001.
- [3] Рыжов В.А., Кулаев П.В. *Способ работы двигателя внутреннего сгорания*. Патент РФ 2377423. Заявл. 20.05.2008, опубл. 27.12.2009.
- [4] Shatrov M.G., Dunin A.Y., Golubkov L.N. et al. Opportunity analysis of signal management for organization of boot-shaped fuel injection without modifying design of CRI injector. *EMSTECH*, 2020, art. 9261560, doi: <https://doi.org/10.1109/EMSTECH49634.2020.9261560>
- [5] Дунин А.Ю., Шатров М.Г., Голубков Л.Н. и др. Организация ступенчатой характеристики впрыскивания топлива управлением электрическим импульсом, поступающим на электромагнит форсунки аккумуляторной топливной системы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 32–42, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-1-32-42>
- [6] Луканин В.Н., ред. *Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1 Теория рабочих процессов*. Москва, Высшая школа, 2010. 479 с.
- [7] Чайнов Н.Д., ред. *Конструирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2008. 496 с.
- [8] Грехов Л.В., Денисов А.А., Старков Е.Е. Выбор и обоснование типа и параметров топливоподающей аппаратуры перспективных дизелей. *Известия ВолгГТУ*, 2014, № 18, с. 11–14.
- [9] Рыжов В.А., Таланов В.В. Система топливоподачи типа Common Rail для двигателя нового поколения 12ЛДГ500 ОАО «Коломенский завод». *Наука, техника, педагогика. Новые технологии высшей школы. Мат. Всерос. науч.-практ. конф.* Москва, Московский Политех, с. 229–236.
- [10] Ионин В.Е. *Трехфазная подача топлива как средство улучшения экологических показателей среднеоборотного дизельного двигателя*. Москва, Московский Политех, 2022. 86 с.
- [11] Рыжов В.А. Результаты экспериментальных исследований пусковых свойств судового дизель-генератора. *Двигателестроение*, 2019, № 4, с. 10–14.
- [12] Quynh N.T., Shatrov M.G., Golubkov L.N. et al. Influence of injection pressure and pressure oscillation and on the rate of fuel outflow from the sprayer of an electrohydraulic



- diesel nozzle. *WECNF*, 2021, art. 9470538, doi: <https://doi.org/10.1109/WECNF51603.2021.9470538>
- [13] Dunin A.Y., Quynh N.T., Golubkov L.N. Computational study of the effect of increasing the fuel injection pressure up to 3000 bar on the performance of the diesel engine and its gaseous emissions. *EMCTECH*, 2020, art. 9261516, doi: <https://doi.org/10.1109/EMCTECH49634.2020.9261516>
- [14] Shatrov M.G., Dunin A.U., Dushkin P.V. et al. Influence of pressure oscillations in common rail injector on fuel injection rate. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 579–593, doi: <https://doi.org/10.22190/FUME200611042S>
- [15] Shatrov M.G., Malchuk V.I., Dunin A.Y. A laboratory investigation into the fuel atomization process in a diesel engine for different configurations of the injector nozzles and flow conditions. *Fluid Dyn. Mater. Process.*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 747–760, doi: <https://doi.org/10.32604/FDMP.2020.08991>
- [16] Никитин Е.А., Рыжов В.А., Кулаев П.В. *Топливный насос высокого давления*. Патент РФ 2161720. Заявл. 24.03.1999, опубл. 10.01.2001.
- [17] Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Копцев В.П. *Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности*. Ленинград, Машиностроение, 1990. 240 с.

## References

- [1] Ryzhov V.A. *Sovershenstvovanie kharakteristik forsirovannykh sredneoborotnykh dvigateley dvoynogo naznacheniya sredstvami toplivopodachi i vozdukhosnabzheniya*. Diss. dok. tekhn. nauk [Improvement of characteristics of boosted Medium-speed dual-purpose engines with fuel supply and air supply means air supply. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ. 2018. 325 p. (In Russ.).
- [2] Nikitin E.A., Ulanovskiy E.A., Ryzhov V.A. *Sposob raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Method of operation of internal combustion engine]. Patent RU 2164300. Appl. 23.02.1999, publ. 20.03.2001. (In Russ.).
- [3] Ryzhov V.A., Kulaev P.V. *Sposob raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Method of internal combustion engine operation]. Patent RU 2377423. Appl. 20.05.2008, publ. 27.12.2009. (In Russ.).
- [4] Shatrov M.G., Dunin A.Y., Golubkov L.N. et al. Opportunity analysis of signal management for organization of boot-shaped fuel injection without modifying design of CRI injector. *EMCTECH*, 2020, art. 9261560, doi: <https://doi.org/10.1109/EMCTECH49634.2020.9261560>
- [5] Dunin A.Yu., Shatrov M.G., Golubkov L.N. et al. Providing boot-type injection rate shape by electric impulse control of the common rail injector. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 1, pp. 32–42, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-1-32-42> (in Russ.).
- [6] Lukanin V.N., ed. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Kn. 1 Teoriya rabochikh protsessov* [Combustion engines. Vol. 1. Theory of working processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 479 p. (In Russ.).
- [7] Chaynov N.D., ed. *Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Design of combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 496 p. (In Russ.).
- [8] Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov E.E. Selection and justification of type and parameters of fuel supply apparatus of prospective diesel engines. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia VSTU], 2014, no. 18, pp. 11–14. (In Russ.).
- [9] Ryzhov V.A., Talanov V.V. [Common rail power system of new generation engine 12LDG500 OJSC "Kolomensky zavod"]. *Nauka, tekhnika, pedagogika. Novye tekhnologii vysshey shkoly. Mat. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Science, Technics, Pedagogics. New Technologies of high School. Proc. Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, Moskovskiy Politekh, pp. 229–236. (In Russ.).
- [10] Ionin V.E. *Trekhfaznaya podacha topliva kak sredstvo uluchsheniya ekologicheskikh pokazateley sredneoborotnogo dizelnogo dvigatelya* [Three-phase fuel supply as a means of improving the environmental performance of a medium-speed diesel engine]. Moscow, Moskovskiy Politekh Publ., 2022. 86 p. (In Russ.).

- [11] Ryzhov V.A. Starting performance of a marine diesel-generator. *Dvigatelistroenie*, 2019, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.).
- [12] Quynh N.T., Shatrov M.G., Golubkov L.N. et al. Influence of injection pressure and pressure oscillation and on the rate of fuel outflow from the sprayer of an electrohydraulic diesel nozzle. *WECNF*, 2021, art. 9470538, doi: <https://doi.org/10.1109/WECNF51603.2021.9470538>
- [13] Dunin A.Y., Quynh N.T., Golubkov L.N. Computational study of the effect of increasing the fuel injection pressure up to 3000 bar on the performance of the diesel engine and its gaseous emissions. *EMCTECH*, 2020, art. 9261516, doi: <https://doi.org/10.1109/EMCTECH49634.2020.9261516>
- [14] Shatrov M.G., Dunin A.U., Dushkin P.V. et al. Influence of pressure oscillations in common rail injector on fuel injection rate. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 579–593, doi: <https://doi.org/10.22190/FUME200611042S>
- [15] Shatrov M.G., Malchuk V.I., Dunin A.Y. A laboratory investigation into the fuel atomization process in a diesel engine for different configurations of the injector nozzles and flow conditions. *Fluid Dyn. Mater. Process.*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 747–760, doi: <https://doi.org/10.32604/FDMP.2020.08991>
- [16] Nikitin E.A., Ryzhov V.A., Kulaev P.V. *Toplivnyy nasos vysokogo davleniya* [High-pressure fuel pump]. Patent RU 2161720. Appl. 24.03.1999, publ. 10.01.2001. (In Russ.).
- [17] Semenov B.N., Pavlov E.P., Koptsev V.P. *Rabochiy protsess vysokooborotnykh dizeley maloy moshchnosti* [Operating process of high-speed low-power diesel engines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 240 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.09.2023

## Информация об авторах

**РЫЖОВ Валерий Александрович** — доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета (140402, Коломна, Российская Федерация, ул. Октябрьской революции, д. 408, e-mail: vaierijkornneev587@gmail.com).

**ШАТРОВ Михаил Георгиевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и автотракторные двигатели». Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский пр-т, д. 64, e-mail: mikl-shatrov@yandex.ru).

**ИОНИН Владимир Евгеньевич** — аспирант кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели». Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета; инженер-конструктор первой категории. ООО «ИЦД ТМХ» (140408, Коломна, Российская Федерация, ул. Партизан, д. 42, e-mail: vladimirionin777@gmail.com).

## Information about the authors

**RYZHOV Valery Aleksandrovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Internal Combustion Engines. Kolomna Institute, Branch of the Moscow Polytechnic University (140408, Kolomna, Russian Federation, Oktyabrskoy Revolyutsii Str., Bldg. 408, e-mail: vaierijkornneev587@gmail.com).

**SHATROV Mikhail Georgievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Heat Engineering and automotive engines. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradskiy Ave., Bldg. 64, e-mail: mikl-shatrov@yandex.ru).

**IONIN Vladimir Evgenievich** — Postgraduate. Heat Engineering and automotive engines. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Senior Lecturer, Internal Combustion Engine. Kolomna Institute (Branch), Moscow Polytechnic University; Design Engineer of 1<sup>st</sup> Category. LLC ICD TMH (140408, Kolomna, Russian Federation, Partizan St., Bldg. 42, e-mail: vladimirionin777@gmail.com).

**ВАРШАВСКИЙ Андрей Алексеевич** — старший преподаватель кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета; аспирант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана; ведущий инженер-конструктор ООО «ИЦД ТМХ» (140408, Коломна, Российская Федерация, ул. Партизан, д. 42, e-mail: andrew\_warsaw@mail.ru).

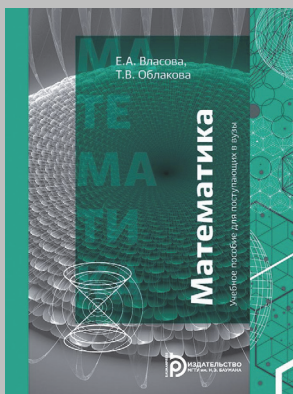
**VARSHAVSKY Andrey Alekseevich** — Senior Lecturer, Department of Internal Combustion Engines. Kolomna Institute, Branch of the Moscow Polytechnic University; Postgraduate, Department of Combined Engines and Alternative Power Plants. Ю Bauman Moscow State Technical University; Leading Design Engineer. LLC ICD TMKh (140408, Kolomna, Russian Federation, Partizan St., Bldg. 42, e-mail: andrew\_warsaw@mail.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Рыжов В.А., Шатров М.Г., Ионин В.Е., Варшавский А.А. Улучшение экологических показателей среднеоборотного дизельного двигателя путем применения трехфазной подачи топлива. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 3, с. 66–76.

**Please cite this article in English as:**

Ryzhov V.A., Shatrov M.G., Ionin V.E., Varshavsky A.A. Improving ecological performance of a medium-speed diesel engine by introducing the three-phase fuel supply. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 3, pp. 66–76.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие**

**«Математика»**

**Авторы: Е.А. Власова, Т.В. Облакова**

Рассмотрены основные разделы школьного курса математики. Приведен необходимый справочный теоретический материал, достаточно полно изложены основные методы решения задач разного уровня сложности. Большинство представленных задач предлагалось на физико-математических олимпиадах, проводимых МГТУ им. Н.Э. Баумана. Большое внимание уделено освоению таких тем, как «Решение задач с параметром» и «Решение стереометрических задач». Для проверки усвоения материала по каждой теме предложены контрольные работы и приведены ответы на них.

Для учащихся старших классов средних школ, гимназий, лицеев, слушателей подготовительных курсов, выпускников средних специальных учебных заведений, а также лиц, самостоятельно изучающих математику и готовящихся к вступительным испытаниям в технические вузы (в частности, по результатам ЕГЭ и физико-математических олимпиад).

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>