

**МЕТОДИКА СКВОЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПЛИВОПОДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ПО ТРЕБОВАНИЯМ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ К ДИЗЕЛЮ**

Л.В. Грехов

А.А. Денисов

Е.Е. Старков

Ф.Б. Барченко

А.С. Кулешов

Н.С. Маластовский

neon.bmstu@gmail.com

starkovmstu1991@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Приведена разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана методика сквозного проектирования топливоподающей аппаратуры в соответствии с требованиями, предъявляемыми к дизелю, в частности экологическими. Методика разработана с использованием современных программных комплексов, позволяющих осуществлять подобную работу с существенной экономией ресурсов. В качестве объектов исследования использованы разрабатываемые в России дизельные двигатели для судового и тепловозного применения. Результатом являются разработанные и запатентованные аккумуляторные топливные системы, характеризующиеся высокой технологичностью, позволяющие за счет формирования характеристики впрыскивания реализовывать малотоксичный и энергоэффективный рабочий процесс дизельных двигателей

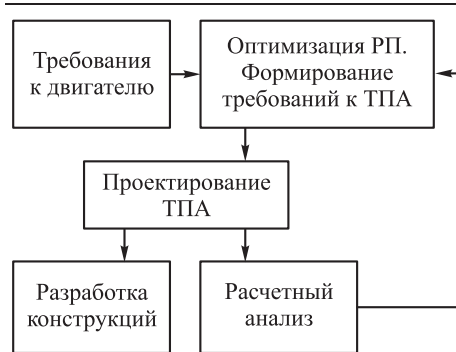
**Ключевые слова**

*Малотоксичный дизель, аккумуляторная топливная система, формирование характеристики впрыскивания*

Поступила в редакцию 29.05.2017  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Важнейшим вопросом при создании и доводке современных двигателей является улучшение экологических показателей. Немалую роль в достижении требуемого экологического уровня дизелей играет топливоподающая аппаратура (ТПА). Применение усовершенствованной ТПА, позволяющей управлять процессом сгорания, является более приоритетным, нежели реализация обработки отработавших газов [1].

В МГТУ им. Н.Э. Баумана создана и апробирована технология сквозного проектирования двигателя и ТПА [2, 3]. Технология основывается на требованиях, предъявляемых к двигателю, в частности экологических. Выполняется оптимизационный расчет рабочего процесса, в ходе которого формулируются технические требования к ТПА, используемые при ее проектировании. Процесс итерационный: после уточнения параметров функционирования ТПА проводится повторный расчет рабочего процесса. Концепция данного подхода приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема технологии сквозного проектирования

Оптимизационные работы заключаются в минимизации функции цели, учитывают многорежимность работы дизеля, а также ограничения параметров рабочего процесса, таких как максимальное допустимое давление в цилиндре двигателя, температура, предельная скорость повышения давления, экологические параметры. Используемый в настоящей работе известный ПК «ДИЗЕЛЬ-РК» [2], разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, основан на термодинамической модели рабочего

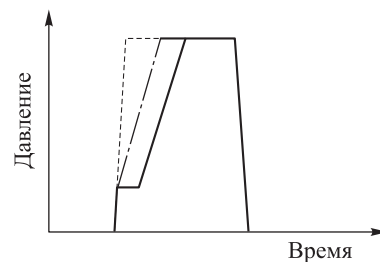
процесса и прошел проверку в многочисленных исследованиях, проведенных для разных типов двигателей. В ПК «ДИЗЕЛЬ-РК» используется многозонная модель топливных струй, что позволяет говорить о корректном расчете экологических показателей.

В отличие от широко применяемых технологий трехмерной вычислительной газодинамики, реализуемый феноменологический подход позволяет в необходимой степени формализовать процесс оптимального поиска при значительном снижении уровня временных затрат. По сравнению с экспериментальными исследованиями такой подход имеет большую свободу в выборе независимых параметров оптимизации и характеризуется несомненной экономией ресурсов.

Объектами исследований являются три перспективных российских дизеля, разработка которых начата в 2013–2014 гг.: Д200 (6ЧН20/28) ОАО «Пензадизельмаш», ДМ-185Т (12ЧН18,5/21,5) ОАО «УДМЗ», М150М (12ЧН15/17,5) ОАО «Звезда». В настоящее время они находятся на стадии подготовки к производству.

При оптимизации рабочего процесса выполняется большое количество расчетно-оптимизационных сессий, в ходе которых оценивают в том числе влияние параметров топливоподачи на показатели рабочего процесса. Так, в настоящей работе исследована возможность достижения требуемых экологических показателей с реализацией впрыскивания топлива со сформированным особым образом передним фронтом характеристики впрыскивания. Эффективность данного подхода выявлена при ступенчатом либо ломаном переднем фронте (рис. 2). Такое решение известно для реализации в традиционной ТПА, однако новое для аккумуляторных систем.

Идея формирования переднего фронта характеристики впрыскивания имеет общую цель с организацией пилотного впрыскивания: снижение доли топли-



**Рис. 2.** Различные формы переднего фронта характеристики впрыскивания (штриховая — трапецевидная; штрихпунктирная — ломаная; сплошная — ступенчатая)

ва, испаряющегося в камере сгорания за период задержки воспламенения. Процесс топливоподачи с формированием характеристики впрыскивания, будучи эффективным решением для организации малотоксичного рабочего процесса с помощью топливных систем непосредственного действия, на сегодняшний день снова становится актуальным применительно к аккумуляторным топливным системам [4–6]. Так, в работах [5, 6], описывающих топливоподающие системы для двигателей, ориентированных на перспективные экологические требования (следующие за автомобильными нормами уровня Euro VI), один из мировых лидеров в области производства ТПА компания Delphi заявляет о необходимости формирования переднего фронта характеристики впрыскивания.

Компании Bosch и Daimler также рассматривают возможность формирования переднего фронта характеристики впрыскивания, однако путем введения второго канала управления электрогидравлической форсункой (ЭГФ) и мультипликации давления (Daimler X-Pulse, Bosch CRIN 4.2), что существенно усложняет систему управления ТПА, повышает стоимость, снижает надежность ЭГФ.

Оба варианта переднего фронта: ступенчатый и ломаный оказывают схожее влияние на показатели рабочего процесса. В процессе оптимизации варьировались также и численные параметры характеристик. Для ступеньки это ее относительная протяженность  $X_i$  и высота  $Y_i$  (рис. 3).

В процессе оптимизации рабочего процесса для формирования требований к ТПА, кроме формы характеристики впрыскивания, рассматриваются следующие параметры оптимизации: число и диаметр сопловых отверстий распылителя, углы направления струй, общая продолжительность подачи (давление впрыскивания), а также некоторые параметры двигателя — угол опережения впрыскивания. В ряде случаев добавляются параметры камеры сгорания, основные термодинамические параметры (степень сжатия, давление наддува). Эти параметры относим к связанным, прочие считаем несвязанными, их в целях облегчения решения задачи оптимизируем отдельно.

В целом выявлена необходимость формирования ступенчатой либо ломаной характеристики с умеренной амплитудой порядка 0,6–0,8. Оптимизации подвергаются все характерные режимы работы двигателя. Имеются решения, отвечающие одновременно требованиям разных режимов.

Таким образом, сформулирована потребность поддержания максимального давления впрыскивания в интервалах мощности и частот. Оптимальным является одноразовое впрыскивание со ступенчатым либо ломаным передним фронтом характеристики. При этом параметры ступеньки либо первого участка ло-

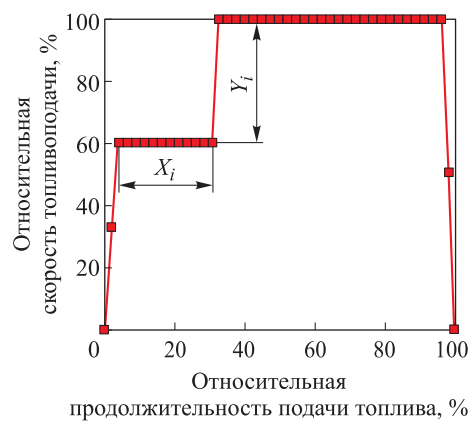
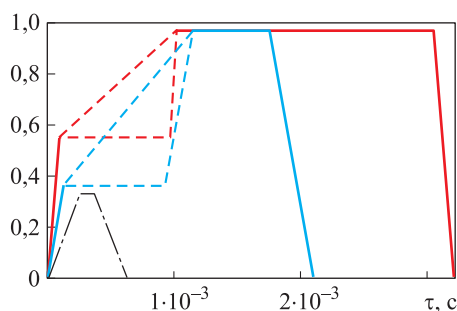


Рис. 3. Оптимизируемые параметры профиля характеристики впрыскивания

маного переднего фронта оказались универсальными как для номинального режима, так и для режимов частичной нагрузки в выражении в единицах времени (рис. 4). Это относилось ко всем трем форсированным новым дизелям, но, разумеется, только к условиям работы по тепловозной и винтовой характеристикам. Многоразовое впрыскивание, широко применяемое в высокооборотных дизелях, в среднеоборотных дизелях для удовлетворения требований Euro Stage IIIB для тепловозных и IMO Tier III судовых оказалось нежелательным. Формирование многоразового или сложного впрыскивания на режиме холостого хода также не требуется.



**Рис. 4.** Характеристики впрыскивания на различных режимах работы двигателя: номинальный режим (красная — сплошная), режим нагрузки 50 % (синяя — штриховая), режим холостого хода (черная — штрихпунктирная)

При реализации описываемой методики в начале процесса проектирования ТПА были выявлены основные тенденции развития. Для оценки их эффективности и разработки предлагаемых решений по формированию характеристики впрыскивания были сформулированы критерии совершенства, а также критерии оценки перспективности ТПА.

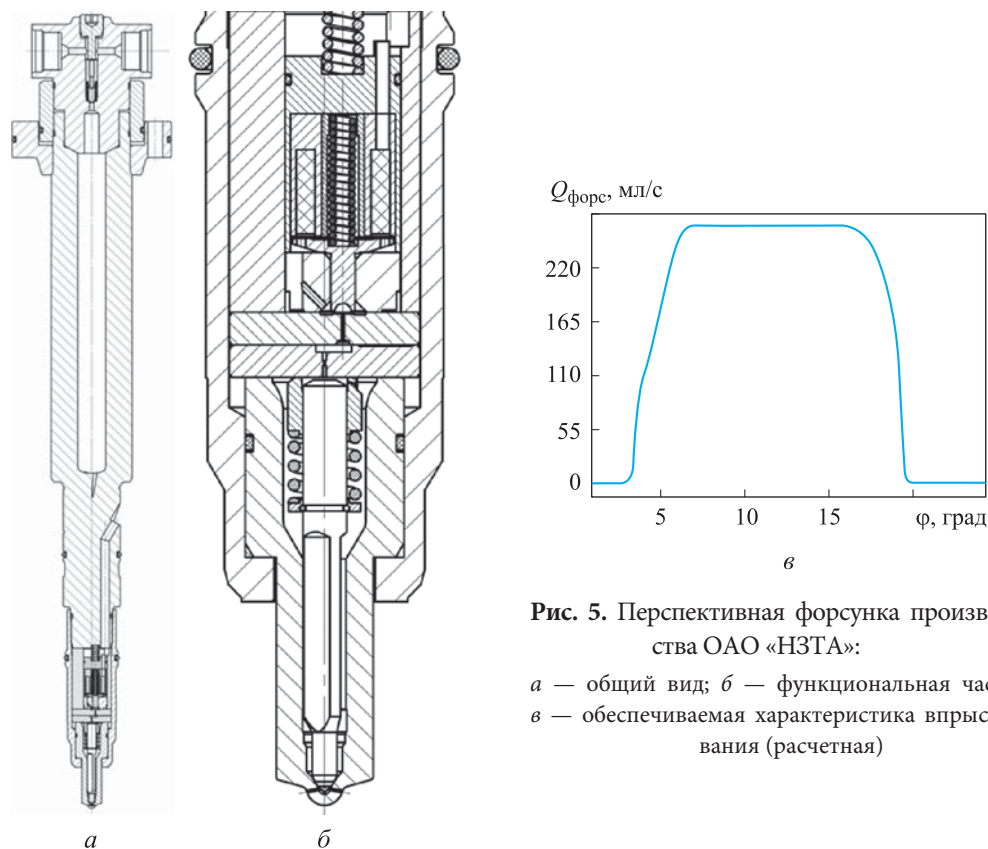
Критерии совершенства включают в себя следующие качества:

- максимальное давление впрыскивания (при заданном давлении в аккумуляторе);
- минимальный расход на управление;
- монотонность характеристики  $g_{ц} = f(\tau_{эл. прив})$ ;
- возможность организации минимальной цикловой подачи  $g_{ц}^{min}$ .

Критерии оценки перспективности выражаются в способности обеспечить повышенное давление впрыскивания; простоте и технологичности; в возможности формирования ломаного либо ступенчатого переднего фронта характеристики впрыскивания.

В качестве базовой конструкции была использована перспективная форсунка ОАО «НЗТА», разработанная для создаваемых дизелей (рис. 5). Она не позволяет формировать ни ступенчатый, ни ломаный передний фронты, однако, имеет ряд эффективных технических решений, таких как использование плавающей втулки в распылителе, отказ от мультипликатора запираения, максимальное приближение камеры управления к игле.

Разработано большое число технических решений, позволяющих обеспечить требования, предъявляемые со стороны рабочего процесса двигателя [7]. Среди них: организация дополнительного дросселирующего сечения в распы-



**Рис. 5.** Перспективная форсунка производства ОАО «НЗТА»:

*a* — общий вид; *б* — функциональная часть;  
*в* — обеспечиваемая характеристика впрыскивания (расчетная)

лителе, две запирающие пружины, дополнительная камера управления в ЭГФ, регулируемое байпасирование жиклера клапана, активное использование волновых процессов.

Во всех предлагаемых технических решениях эффект достигается за счет особенностей работы ЭГФ, за исключением системы с активным использованием волновых процессов в линии высокого давления.

В ходе дальнейшего анализа разработанных решений были проведены расчетно-оптимизационные исследования, которые выявили как достоинства предложенных систем, так и недостатки, в некоторых случаях критические.

Так, приоритетными решениями являются следующие: с активным использованием волновых процессов, с дополнительным дросселирующим сечением, а также решение с ЭГФ с байпасированием жиклера камеры управления, на которые были оформлены соответствующие патентные заявки.

**Выводы.** 1. Разработанная методика проектирования, основанная на оптимизации рабочего процесса, позволяет создавать ТПА по критериям экологии и энергоэффективности дизельных двигателей.

2. Обоснована возможность универсализации характеристик впрыскивания по режимам работы среднеоборотных дизелей, обеспечивающих выполнение прогрессивных экологических требований.

3. Предложен ряд технологичных технических решений для обеспечения требуемых характеристик впрыскивания при использовании аккумуляторной топливной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Desantes J.M., Benajes J., Molina S., Gonzalez C.A.* The modification of fuel injection rate in heavy-duty diesel engines. P. 1. Effects on engine performance and emissions // *Applied Thermal Engineering*. 2004. Vol. 24. No. 17–18. P. 2701–2714. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.05.003
2. *Kuleshov A.S., Grekhov L.V.* Multidimensional optimization of DI diesel engine process using multi-zone fuel spray combustion model and detailed chemistry NO<sub>x</sub> formation model // *SAE Tech. Pap.* 2013. No. 2013-01-0882. DOI: 10.4271/2013-01-0882
3. *Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A.* Optimization of mixture formation and combustion in two-stroke OP engine using innovated diesel spray combustion model and fuel system simulation software // *SAE Tech. Pap.* 2015. No. 2015-01-1859. DOI: 10.4271/2015-01-1859
4. *Luckhchoura V.* Modeling of injection-rate shaping in diesel engine combustion. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Deutschland, 2010. 142 p.
5. *Beyond euro VI — development of a next generation fuel injector for commercial vehicles / M. Graham, S. Crossley, T. Harcombe, N. Keeler, T. Williams // SAE Tech. Pap.* 2014. No. 2014-01-1435. DOI: 10.4271/2014-01-1435
6. *Hardy C.S., Hudson C.M., Harper M.S., Ainsworth D.M.* Pressure is nothing without control: evolution of control valve design // *Fuel Systems for IC Engines*. 2012. P. 115–128.
7. *Grekhov L., Denisov A., Onishchenko D., Starkov E.* New generation line of high efficiency common rail fuel injectors for low emission heavy-duty diesel engine // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. No. 4. P. 22558–22570.

**Грехов Леонид Вадимович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Денисов Александр Александрович** — ассистент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Старков Егор Евгеньевич** — аспирант кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Барченко Филипп Борисович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Кулешов Андрей Сергеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Маластовский Николай Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).



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

Гpехов Л.В., Денисов А.А., Старков Е.Е., Барченко Ф.Б., Кулешов А.С., Маластовский Н.С. Методика сквозного проектирования топливopодающей аппаратуры по требованиям, предъявляемым к дизелю // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 3. С. 103–110. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-103-110

**END-TO-END FUEL SUPPLY SYSTEM DESIGN METHOD ACCORDING TO THE REQUIREMENTS POSED TO A DIESEL ENGINE**

**L.V. Grekhov**

**A.A. Denisov**

**E.E. Starkov**

**F.B. Barchenko**

**A.S. Kuleshov**

**N.S. Malastovskiy**

neon.bmstu@gmail.com

starkovmstu1991@mail.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

**Abstract**

We present an end-to-end fuel supply system design method developed in BMSTU in accordance with requirements posed to a diesel engine, environmental requirements in particular. We developed our method using modern software packages that enable this work to be done with significant resource savings. The objects of our research were marine and locomotive diesel engines developed in Russia. Our investigation resulted in fully designed and patented common rail systems characterised by high efficiency, which implement a low-emission and energy-efficient diesel engine work cycle by means of fuel injection characteristic shaping

**Keywords**

*Low-emission diesel engine, common rail, fuel injection characteristic shaping*

Received 29.05.2017

© BMSTU, 2018

---

**REFERENCES**

- [1] Desantes J.M., Benajes J., Molina S., Gonzralez C.A. The modification of fuel injection rate in heavy-duty diesel engines. P. 1. Effects on engine performance and emissions. *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, no. 17–18, pp. 2701–2714. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2004.05.003
- [2] Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Multidimensional optimization of DI diesel engine process using multi-zone fuel spray combustion model and detailed chemistry NO<sub>x</sub> formation model. *SAE Tech. Pap.*, 2013, no. 2013-01-0882. DOI: 10.4271/2013-01-0882
- [3] Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A. Optimization of mixture formation and combustion in two-stroke OP engine using innovated diesel spray combustion model and fuel system simulation software. *SAE Tech. Pap.*, 2015, no. 2015-01-1859. DOI: 10.4271/2015-01-1859
- [4] Luckhchoura V. Modeling of injection-rate shaping in diesel engine combustion. Rheinisch-Westfalischen Technischen Hochschule Aachen. Deutschland, 2010. 142 p.
- [5] Graham M., Crossley S., Harcombe T., Keeler N., Williams T. Beyond euro VI — development of a next generation fuel injector for commercial vehicles. *SAE Tech. Pap.*, 2014, no. 2014-01-1435. DOI: 10.4271/2014-01-1435

[6] Hardy C.S., Hudson C.M., Harper M.S., Ainsworth D.M. Pressure is nothing without control: evolution of control valve design. *Fuel Systems for IC Engines*, 2012, pp. 115–128.

[7] Grekhov L., Denisov A., Onishchenko D., Starkov E. New generation line of high efficiency common rail fuel injectors for low emission heavy-duty diesel engine. *International Journal of Pharmacy and Technology*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 22558–22570.

**Grekhov L.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Denisov A.A.** — Assistant, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Starkov E.E.** — post-graduate student, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Barchenko F.B.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kuleshov A.S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Malastovskiy N.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

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

Grekhov L.V., Denisov A.A., Starkov E.E., Barchenko F.B., Kuleshov A.S., Malastovskiy N.S. End-to-End Fuel Supply System Design Method According to the Requirements Posed to a Diesel Engine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 3, pp. 103–110 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-3-103-110