

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108775>

Оригинальное исследование



# Оценка влияния конструкции ТНВД системы Common Rail на равномерность топливоподачи в топливный аккумулятор

С.П. Кулманаков, С.А. Тютиков

Алтайский государственный технический университет, Барнаул, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** В настоящее время все мировые производители дизельных двигателей направили свою стратегию развития на снижение вредных выбросов, повышение топливной экономичности и увеличение литровой мощности. Для достижения этого – применения одной лишь системы аккумуляторного типа недостаточно. Необходимо применять, как новые дополнительные устройства, например, нейтрализатор отработавших газов, систему рециркуляции отработавших газов, впрыск дополнительных жидкостей совместно с дизельным топливом, так и проводить улучшение уже имеющихся. Повышение точности цикловой подачи форсунки позволит более точно настроить топливную систему двигателя, что положительно скажется на всех направлениях развития дизелестроения. Цикловая подача форсунки зависит от давления топлива на ее входе и от времени подачи управляющего сигнала. Пульсация давления при неизменном времени создает неравномерность цикловой подачи форсунки. Возможность снижения пульсаций давления на входе в форсунку во многом определяет конструкцию топливного насоса высокого давления, т.к. он порционный подает топливо. Оптимизация его конструкции позволит повысить точность цикловой подачи, что в свою очередь даст положительный эффект развитию перспективных направлений дизелестроения.

**Цель работы** – исследование неравномерности топливоподачи топливными насосами различной конструкции дизельных двигателей с аккумуляторной топливной системой типа Common Rail с целью снижения колебаний топлива и повышения стабильности цикловой подачи форсунки.

**Методы.** Для оценки эффективности конструкций топливных насосов высокого давления были смоделированы данные конструкции в специализированном программном обеспечении. Проведены теоретические исследования по неравномерности топливоподачи насосов различных конструкций.

**Результаты.** Получены графики неравномерности топливоподачи насосов высокого давления в зависимости от их конструкции.

**Заключение.** На основании расчетов сделаны выводы о влиянии конструкции на неравномерность топливоподачи насосов разных конструкций, даны рекомендации по применению.

**Ключевые слова:** дизель; топливная система; Common Rail; вредные выбросы; пульсация давления; цикловая подача; топливный насос высокого давления.

## Для цитирования:

Кулманаков С.П., Тютиков С.А. Оценка влияния конструкции ТНВД системы Common Rail на равномерность топливоподачи в топливный аккумулятор // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 4. 2022. С. 255–261. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108775>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108775>

Original study article

# Assessment of influence of the Common Rail system high-pressure fuel pump design on regularity of fuel supply to a fuel accumulator

Sergey P. Kulmanakov, Sergey A. Tyutikov

Altay State Technical University, Barnaul, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** At the present time all worldwide diesel engine manufacturers have directed their development strategies on the way of reduction of harmful emissions, fuel efficiency improving and increasing of the power per liter. Using only accumulator type system is not sufficient for the goals achievement. It is necessary to use new auxiliary units, such as an exhaust catalyst, an exhaust recirculation system, injection of additional liquids together with diesel fuel, as well as to improve the existing units. Increasing the accuracy of injection rate of a nozzle will make it possible to adjust the engine fuel system more precisely, that will have a positive effect on all development directions of diesel engine engineering. Injection rate of a nozzle is dependent on fuel pressure in the nozzle inlet and on control signal timing. Pressure pulsation with stable timing cause irregularity of injection rate of a nozzle. Possibility of decreasing of nozzle inlet pressure pulsation is mainly defined by design of a high-pressure fuel pump, as it supplies fuel partially. The design optimization will make it possible to increase the accuracy of injection rate, that will make a positive effect on development of the diesel engines promising areas.

**AIMS:** Study of irregularity of fuel supply by fuel pumps of various diesel engines designs with the Common Rail fuel accumulation system, aimed to decrease fuel oscillations and to improve stability of injection rate of a nozzle.

**METHODS:** In order to assess the efficiency of high-pressure fuel pump designs, these designs were simulated in the specialised software. Theoretical studies of fuel supply irregularity for various designs of the pumps were carried out.

**RESULTS:** Graphs of non-uniformity of fuel supply of high-pressure pumps depending on their design are obtained.

**CONCLUSIONS:** Based on simulations, the conclusions about design influence on fuel supply irregularity of various designs of pump are made, recommendations for use are given.

**Keywords:** diesel; fuel system; Common Rail; harmful emissions; pressure pulsation; injection rate; high-pressure fuel pump.

## Cite as:

Kulmanakov SP, Tyutikov SA. Assessment of influence of the Common Rail system high-pressure fuel pump design on regularity of fuel supply to a fuel accumulator. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(4):255–261. DOI: : <https://doi.org/10.17816/0321-4443-108775>

Received: 16.06.2022

Accepted: 17.08.2022

Published online: 15.09.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Первостепенное направление развития современного двигателестроения направлено на снижение показателей токсичности отработавших газов, повышение топливной экономичности, увеличение литровой мощности и снижение шума и вибраций, воздействующих на человека. Одним из средств решения данной задачи может служить совершенствование параметров топливоподачи [1–3].

Характеристика впрыскивания топлива электрогидравлической форсункой непосредственно влияет на процесс горения в дизеле. Для поддержания стабильной характеристики впрыска топлива форсункой необходимо обеспечить бесперебойную подачу топлива в топливный аккумулятор в необходимом объеме. Так же крайне важно поддерживать необходимое давление в аккумуляторе, которое определяет давление впрыскивания топлива форсункой в цилиндр. Большие колебания давления в аккумуляторе будут приводить к различной цикловой подаче, что отрицательно скажется как на экологических, так и на экономических параметрах дизеля.

Топливный насос высокого давления (далее ТНВД) нагнетает топливо под необходимым давлением. Из-за своей конструкции подача топлива происходит порционно, что вызывает нежелательные волновые явления.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является определение влияния конструкции ТНВД аккумуляторной топливной системой типа Common Rail на неравномерность топливоподачи в топливный аккумулятор и оценки возможности снижения колебаний топлива для повышения стабильности цикловой подачи форсунки.

## ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки волновых явлений высокого давления была испытана на безмоторном стенде опытная полнокомплектная топливная система типа Common Rail, ТНВД которой имел рядную схему исполнения с двумя секциями, с одновершинным кулачковым валом. Результаты представлены на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что размах колебаний давления в топливном аккумуляторе достигает 17 МПа, в среднем 8 МПа. График неравномерный, что говорит о неодинаковой характеристике впрыска форсунок. Для исключения влияния форсунок на пульсации давления в топливном аккумуляторе дополнительно была испытана система без форсунок на давлении 180 МПа и номинальном режиме работы. Результаты представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что размах колебаний давления в топливном аккумуляторе достигает 10 МПа, график равномерный. На основании чего можем сделать вывод о возможности оптимизации конструкции ТНВД с целью снижения пульсаций давления в аккумуляторе и, впоследствии, повышении точности цикловой подачи форсунки.

Схему выбора количества секций ТНВД и их поочередную работу ранее во много определяла компоновка двигателя и прочности деталей ТНВД. В зависимости от мощности дизельного двигателя и его исполнения ТНВД имеют 3-х лучевую схему или рядную, с количеством секций от 1 до 4, и даже более. При большом литраже дизеля в целях унификации возможно применение в топливной системе 2-х и более ТНВД.

В настоящее время всеми производителями топливной аппаратуры активно используются различные решения по повышению надежности ТНВД, такие как, например, применение износостойких покрытий с минимальным коэффициентом трения для плунжерных

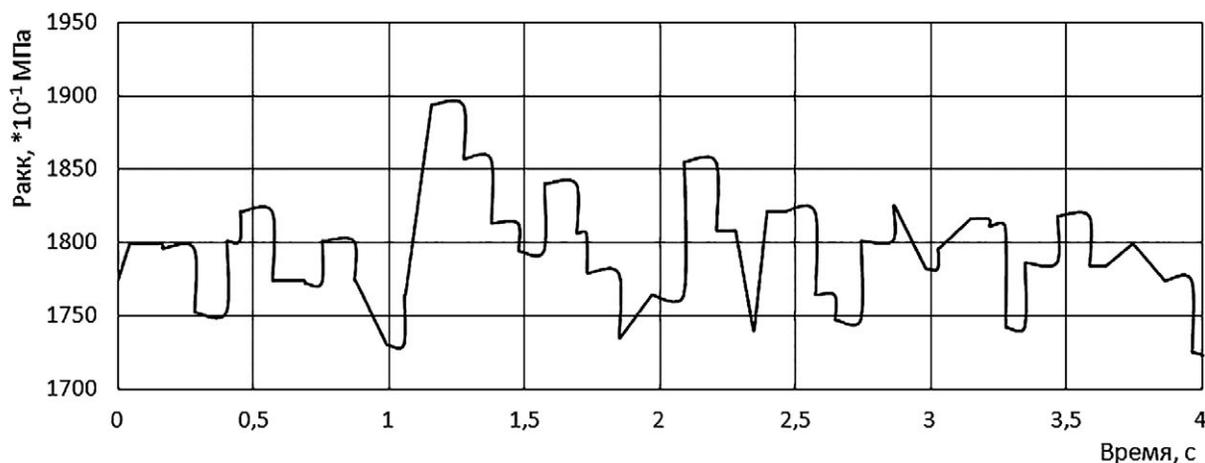
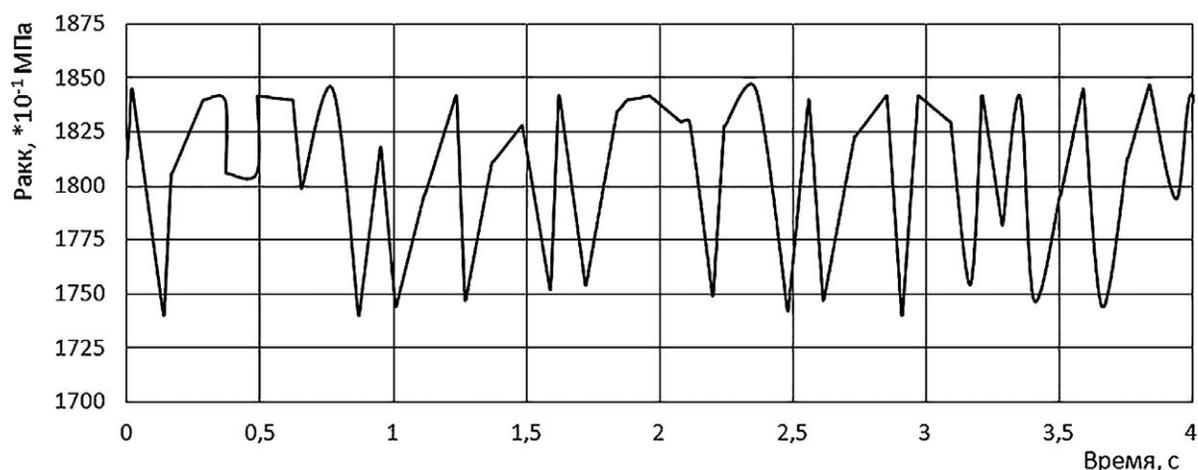


Рис. 1. Размах колебания высокого давления в аккумуляторе с форсунками.

Fig. 1. Range of high pressure oscillations in an accumulator with nozzles.



**Рис. 2.** Размах колебания высокого давления в аккумуляторе без форсунок.

**Fig. 2.** Range of high pressure oscillations in an accumulator without nozzles.

пар, роликовых толкателей, эксцентриковых нажимных шайб валов (призм) и т.д. Также классические бронзовые подшипники скольжения опор валов уступили свое место композитным многослойным материалам с тефлоновым покрытием, которое выдерживает значительно большие окружные скорости и удельные нагрузки. Все это в совокупности дает большие возможности по выбору количества секций, диаметров и ходов плунжеров, выбора одновершинных или многовершинных кулачков для достижения не только минимальных габаритов ТНВД, но и более равномерной накачки топлива в аккумулятор и снижения нагрузки на привод ТНВД.

При выборе конструктивного исполнения ТНВД в первую очередь рассматривается вопрос о том, какой привод организован на двигателе для насоса. В ряде случаев на двигатель, который ранее имел механическую топливную систему, устанавливают аккумуляторную топливную систему Common Rail без изменения передаточного отношения вращения вала ТНВД и коленчатого вала двигателя. Вследствие чего вал ТНВД вращается в 2 раза медленнее по отношению к коленчатому валу, и для получения необходимой производительности ТНВД необходимо либо применять ускоряющий редуктор, либо увеличивать количество насосных секций на рядной компоновке ТНВД. Однако все эти действия приводят к увеличению деталей и габаритов как ТНВД, так и двигателя в целом.

Хорошим решением в таком случае является применения роликовых толкателей совместно с двух-, трех- вершинным кулачком на вале ТНВД, что обеспечивает при минимальных габаритах насоса необходимую производительность ТНВД. В этом случае отпадает необходимость большого изменения привода ТНВД, организованного на двигателе или необходимость применения ускоряющего редуктора. При этом снижается неравномерность потребления мощности, затрачиваемой на ТНВД, и несколько снижается амплитуда колебания давления в аккумуляторе.

Современные двигатели, разработанные изначально под аккумуляторную топливную систему, имеют ускоренный привод ТНВД, т.е. привод с частотой вращения либо равной частоте вращения коленчатого вала, либо превышающей ее. В таком случае возможно применение как роликового толкателя, так и цилиндрического с нажимной призмой, являющегося более простым и технологичным в изготовлении. Стоит учитывать, что, повышая обороты вала насоса, существует возможность уменьшить габариты насоса, повысить равномерность подачи, обеспечить более надежную пусковую подачу, облегчить условия работы подшипников скольжения. Для справки: авиационные ТНВД работают при частотах до 16–20 тыс. об/мин. Ограничения их быстроходности обуславливаются условиями наполнения плунжерных полостей, безударностью работы толкателей, вибрациями от неуравновешенности. Число насосных секций обеспечивает равномерность подачи и крутящего момента. Не существует разумных аргументов для использования в ТНВД дизеля небольшой мощности с числом насосных секций, больше четырех. При такой схеме сильно снижается прочность вала ТНВД [4, 5].

С целью определения влияния конструкции ТНВД на наполнение топливного аккумулятора и колебания давления топлива в аккумуляторе были исследованы в специализированном программном обеспечении основные распространенные варианты исполнения ТНВД с одинаковой геометрической производительностью около 230 л/ч на номинальном режиме работы (частота вращения вала ТНВД одинаковая для всех случаев и составляет 3200 об/мин):

- 3-х лучевой ТНВД (3 секции расположены под  $120^\circ$  по отношению друг к другу, одновершинный эксцентриковый кулачок),  $d/h=8/8$  мм;
- рядный 2-х секционный ТНВД (работа секций происходит поочередно через каждые  $180^\circ$  по отношению друг к другу, одновершинный эксцентриковый кулачок),  $d/h=8/12$  мм;

- рядный 2-х секционный ТНВД с двухвершинным кулачком (работа секций происходит поочередно через каждые  $90^\circ$  по отношению друг к другу),  $d/h=6/10,5$  мм;
- рядный 2-х секционный ТНВД с трехвершинным кулачком (работа секций происходит поочередно через каждые  $60^\circ$  по отношению друг к другу),  $d/h=6/7,1$  мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

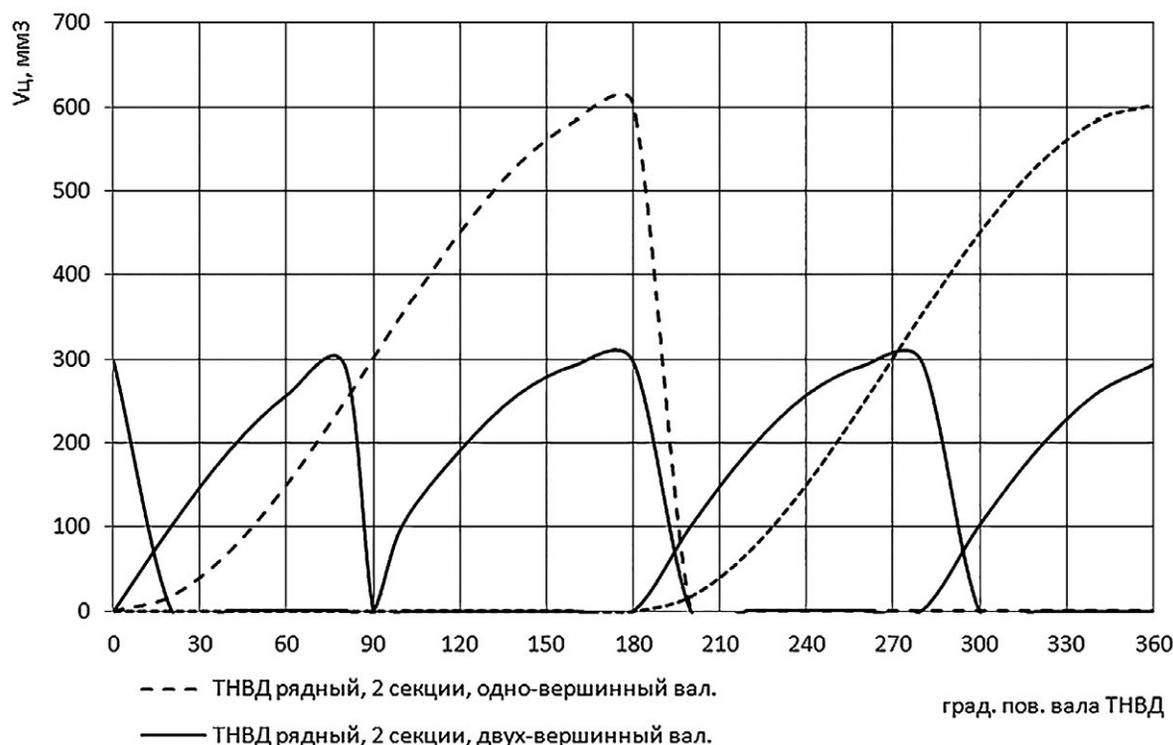
Для достижения быстрого и точного регулирования давления в топливном аккумуляторе с помощью блока дозирующего, установленного в ТНВД, необходимо, чтобы насос подавал как можно меньше цикловые подачи секций насосных в аккумулятор. Чем меньше будет цикловая подача секции насосной, тем меньше произойдет заброс давления в топливном аккумуляторе, т.к. блок дозирующий имеет некую задержку на срабатывание, электронная система управления двигателя считывает всю входную информацию с датчиков и потом подает управляющий сигнал. С этой целью были рассмотрены мгновенные производительности секций насосных вышеуказанных исполнений ТНВД. Результаты исследования представлены графически на рис. 3 и 4.

Схема рядного 2-х секционного насоса с эксцентриковым валом (одновершинный кулачок) менее

приемлема, если судить по неравномерности нагнетания топлива в аккумулятор (см. рис. 1) по сравнению с аналогичной схемой, но с двухвершинным кулачком. Мгновенная цикловая подача секции в первом случае достигает  $600 \text{ мм}^3$ , что в 2 раза больше, чем для схемы с двухвершинным кулачком, и при этом частота подачи топлива в 2 раза ниже (количество подач порций топлива секций насосных в аккумулятор за единицу времени).

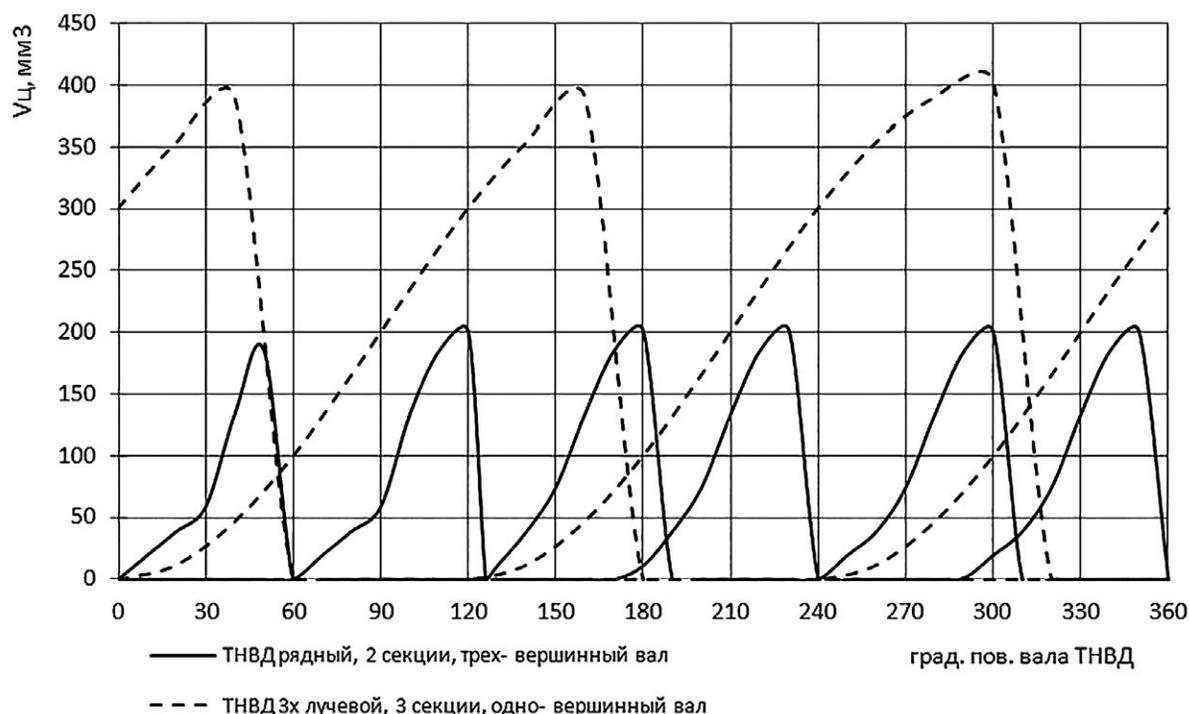
Достоинством рядной схемы насоса с двухвершинным кулачком является возможность работы насоса на меньших частотах вращения вала насоса относительно ТНВД с одновершинным валом. Применение данного типа насоса возможно на дизелях от привода классического насоса, где частота вращения вала насоса в 2 раза ниже частоты вращения коленчатого вала двигателя. Применение в этом случае ТНВД с одновершинным валом может быть нецелесообразно ввиду необходимости увеличения хода и диаметра плунжера секций, что снизит надежность насоса в целом.

Схема 3-лучевого насоса является приемлемой с точки зрения неравномерности нагнетания топлива в аккумулятор и является распространенным вариантом применения в дизелестроении (см. рис. 4). Мгновенная цикловая подача секции достигает  $400 \text{ мм}^3$  что в 1,5 раза ниже мгновенной цикловой подачи рядного 2-х секционного ТНВД с одновершинным валом. При этом частота подачи



**Рис. 3.** График мгновенной производительности секций насосных рядных 2-х секционных ТНВД с одно- и двухвершинными валами.

**Fig. 3.** The graph of instant performance of pumping sections of inline two-sectional high-pressure fuel pumps with one-peak and double-peak shafts.



**Рис. 4.** График мгновенной производительности секций насосных 3-х лучевого ТНВД и рядного 2-х секционного насоса с трех вершинным валом.

**Fig. 4.** The graph of instant performance of pumping sections of a three-radial high-pressure fuel pump and an inline two-sectional pump with triple-peak shaft.

топлива в аккумулятор в 1,5 раза выше. Это позволяет получить более плавное регулирование давления в топливном аккумуляторе.

ТНВД с 3-х лучевой схемой исполнения значительно уступает по неравномерности 2-ух секционным насосам, у которых вал имеет двух- и трехвершинные кулачки. мгновенная цикловая подача у них не превышает 300 и 200 мм<sup>3</sup> соответственно, что является наиболее приемлемой схемой исполнения насоса с точки зрения равномерности накачки топлива в топливный аккумулятор и нагрузки на привод ТНВД. Последнее позволяет достичь наиболее точного и быстрого регулирования давления в топливном аккумуляторе и в свою очередь, повысить точность цикловой подачи электро-гидроуправляемой форсунки в дизеле. Необходимо отметить, что в случае применения схемы рядного ТНВД с трехвершинным валом сложность изготовления вала насоса и повышенные требования точности прецизионной насосной пары вызваны повышенными скоростями трения плунжера.

## ВЫВОДЫ

При адаптации или проектировании новой топливной аппаратуры необходимо уделять должное внимание волновым явлениям. Колебания давления в контуре низкого и высокого давления дизельной топливной системы могут вызывать шум и повреждения деталей. Они влияют на функциональные характеристики и надежность.

Анализ колебаний можно проводить не только по раздельности, но и в комплексной топливной системе, так как необходимо учитывать влияние на параметры колебаний отдельных компонентов системы. Для рассмотрения отдельных компонентов и взаимовлияния компонентов топливной системы между собой на теоретическом уровне можно использовать специализированное программное обеспечение.

На основании вышеприведенных исследований рассмотрены различные конструкции ТНВД системы Common Rail, оценены их достоинства и недостатки по отношению друг к другу.

Анализ рассмотренных схем исполнения ТНВД системы Common Rail показал существенное преимущество ТНВД рядной схемы исполнения с двух- и, особенно, с трехвершинным валом. Однако существуют большие сложности изготовления вышеуказанных деталей и присутствуют повышенные скорости трения плунжера. Применение таких схем исполнения насосов оправданы в дизеле, где организован малооборотный привод ТНВД, и идет речь не только о переводе двигателя на аккумуляторную топливную систему, но и стоит задача по увеличению мощности дизеля.

Распространенная классическая схема исполнения ТНВД с оптимальными среднестатистическими колебаниями накачки топлива в аккумулятор и простотой изготовления является 3-ех лучевая схема исполнения насоса.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** С.А. Тютиков – поиск публикаций по теме статьи, проведение исследований, написание текста рукописи; С.П. Кулманаков – редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** S.A. Tyutikov — search for publications on the topic of the article, researching, writing the text of the manuscript; S.P. Kulmanakov — editing the text of the manuscript, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
2. Марков В.А., Савельев М.А., Селиванов А.В. Улучшение экологических показателей дизеля путем совершенствования системы топливоподдачи // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 18(145). С. 14–18.
3. Тер-Мкртчян Г.Г., Мазинг М.В., Ветошкин А.Г. Обеспечение малотоксичного рабочего процесса форсированных перспектив-

ных дизельных // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10237> дата обращения: 16.06.2022.

4. Грехов Л.В., Габитов А.В., Неговора А.В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей: учеб. пособие. М.: Легион-Автодата. 2013. 273 с.
5. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов. М.: Легион-Автодата, 2005. 344 с.

## REFERENCES

1. Markov VA, Bashirov RM, Gabitov II. Toxicity of exhaust gases of diesel engines. 2nd ed. Moscow: MG TU im. N.E. Bauman; 2002.
2. Markov VA, Saveliev MA, Selivanov AV. Improving the environmental performance of a diesel engine by improving the fuel supply system. *Izv. Volgogradskogo Gos. Tekh. Univ.* 2014;18(145):14-18.
3. Ter-Mkrtychyan GG, Mazing MV, Vetoshkin AG. Ensuring a low-toxic working process for advanced advanced diesel engines. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013;5. Available

from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10237> accessed: 16.06.2022.

4. Grekhov LV, Gabitov AV, Negora AV. Design, calculation and technical service of diesel fuel supply systems: textbook. Moscow: Legion-Avtodata; 2013.
5. Grekhov LV, Ivashchenko NA, Markov VA. Fuel equipment and control systems for diesel engines: a textbook for univ. Moscow: Legion-Avtodata; 2005.

## ОБ АВТОРАХ

### \*Тютиков Сергей Александрович,

аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»;  
адрес: Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул,  
пр. Ленина, д. 46;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0383-3281>;  
eLibrary SPIN: 8413-4705;  
e-mail: tyutikov-c@mail.ru

### Кулманаков Сергей Павлович,

к.т.н.,  
доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7063-9307>;  
eLibrary SPIN: 4673-3445;  
e-mail: spk\_ice@mail.ru

\*Автор для переписки

## AUTHOR'S INFO

### \*Sergey A. Tyutikov,

Postgraduate student of the Internal Combustion Engines  
Department;  
address: 46 prospect Lenina, Barnaul 656038, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0383-3281>;  
eLibrary SPIN: 8413-4705;  
e-mail: tyutikov-c@mail.ru

### Sergey P. Kulmanakov,

Cand. Sci. (Tech.)  
Associate Professor of the Internal Combustion Engines  
Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7063-9307>;  
eLibrary SPIN: 4673-3445;  
e-mail: spk\_ice@mail.ru

\*Corresponding author