

Научная статья  
УДК 629.436.03(031)  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-58-63>  
EDN THTEEX

## **Перспективы развития дизельной топливной аппаратуры в ближайшем будущем**

**Геннадий Бенцианович Горелик, Анатолий Николаевич Соболенко<sup>✉</sup>,  
Сергей Витальевич Пастухов**

*Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,  
Владивосток, Россия, [sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Аннотация.** Приведен анализ положительных качеств широко применяемой сегодня в дизелях топливной аппаратуры типа Common Rail (CR). Отмечены возможность оптимального управления дизелем, высокое давление впрыскивания, ликвидация повторных впрыскиваний топлива, улучшение топливной экономичности, понижение разности амплитуды колебаний крутящего момента по цилиндрам, очень точное регулирование начала подачи топлива, высокая степень диагностируемости топливной аппаратуры, возможность точного регулирования равномерности подач топлива по цилиндрам, возможность обеспечения оптимального регулирования турбокомпрессора, возможность отключения ряда цилиндров и обеспечения пропусков циклов при работе на частичных режимах нагружения. Представлены также недостатки, в частности в системе впрыскивания включено большое число разного рода элементов и датчиков, активаторов и других средств управления, повышенная требовательность топливной аппаратуры типа CR к чистоте и качеству дизельного топлива. При работе на режимах малых подач давление впрыскивания существенно снижается до величины 60–80 МПа, что приводит к перерасходу топлива, стоимость топливной аппаратуры примерно в два раза больше классической топливной аппаратуры, пусковые свойства дизеля (как свидетельствует эксплуатация) резко понижаются после 500–800 ч наработки, возникают проблемы с поддержанием высокого давления в рампе (аккумуляторе), возможные разрывы и нарушения герметичности системы высокого давления ведут к повышенной пожароопасности двигателя. Перечислены причины повышенного нагарообразования и потерь эксплуатационной экономичности и надежности. С помощью методов относительных штрафных баллов выполнено сравнение качества традиционной топливной аппаратуры и аппаратуры типа CR. На основании анализа сделан вывод об области применения этой новой системы и традиционной классической топливной аппаратуры в ближайшем будущем. Во внимание принимались условия эксплуатации, квалификация обслуживающего персонала, современные требования стандартов к шумности, токсичности дизелей и их показателей надежности.

**Ключевые слова:** топливная аппаратура, впрыскивание топлива, давление впрыскивания, цикловая подача, неравномерность подач по цилиндрам, нестабильность последовательных циклов

**Для цитирования:** Горелик Г. Б., Соболенко А. Н., Пастухов С. В. Перспективы развития дизельной топливной аппаратуры в ближайшем будущем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 1. С. 58–63. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-58-63>. EDN THTEEX.

Original article

## **Prospects for the diesel fuel equipment development in the near future**

**Gennady B. Gorelik, Anatoly N. Sobolenko<sup>✉</sup>, Sergey V. Pastukhov**

*Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russia, [sobolenko\\_a@mail.ru](mailto:sobolenko_a@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Abstract.** The analysis of the positive qualities of Common Rail (CR) fuel equipment widely used in diesels today is given. The possibility of optimal diesel control, high injection pressure, elimination of repeated fuel injections, improvement of fuel efficiency, reduction of the difference in the amplitude of torque fluctuations in the cylinders, very precise regulation of the beginning of fuel supply, a high degree of diagnosability of fuel equipment, the possibility

of precise regulation of the uniformity of fuel supply through the cylinders, the ability to ensure optimal regulation of the turbocharger are noted, the ability to turn off a number of cylinders and ensure that cycles are skipped when operating under partial loading conditions. Disadvantages are also presented, in particular, a large number of various elements and sensors, activators and other controls are included in the injection system, as well as the increased demands of CR-type fuel equipment on the purity and quality of diesel fuel. When operating in low-flow modes, the injection pressure is significantly reduced to a value of 60-80 MPa, which leads to fuel overspending, the cost of fuel equipment is about twice as much as classical fuel equipment, the starting properties of diesel (as evidenced by operation) decrease sharply after 500-800 hours of operation, problems arise with maintaining high pressure in the ramp (battery), possible ruptures and leakages of the high-pressure system lead to increased fire hazard of the engine. The reasons for increased carbon formation and loss of operational efficiency and reliability are listed. Using the methods of relative penalty points, the quality of traditional fuel equipment and CR-type equipment was compared. Based on the analysis, a conclusion is made about the scope of application of this new system and traditional classical fuel equipment in the near future. The operating conditions, the qualifications of the maintenance personnel, modern requirements of standards for noise, toxicity of diesel engines and their reliability indicators were taken into account.

**Keywords:** fuel equipment, fuel injection, injection pressure, cyclic feed, uneven feed across cylinders, instability of successive cycles

**For citation:** Gorelik G. B., Sobolenko A. N., Pastukhov S. V. Prospects for the diesel fuel equipment development in the near future. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies. 2024;1:58-63.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-1-58-63>. EDN THTEEX.

### **Введение**

Мнение специалистов по применимости систем впрыска в ближайшем будущем склоняется в пользу уже широко применяемой в моторостроении топливной аппаратуры (ТА) типа Common Rail (CR) вместо так называемой традиционной классической системы впрыскивания. В самом названии заложено понятие «аппаратура будущего». А будущее дизельных двигателей продлится как минимум еще несколько десятилетий, ведь еще не определился перспективный преобразователь энергии топлива в механическую работу. Требования к системам впрыска дизельного топлива непрерывно возрастают. Высокие давления впрыска при ограниченном времени изменения режима и возможность адаптации количества подаваемого топлива к условиям работы двигателя делают дизельный двигатель самым экономичным, экологически чистым и мощным энергоагрегатом. Безусловно, ТА типа CR получает применение для судовых и стационарных двигателей, в том числе для среднеоборотных и малооборотных [1].

### **Очевидные достоинства новой топливной аппаратуры дизелей**

1. Главное свойство очевидно, применяемое в CR электронное управление позволяет решать многие проблемы оптимального управления дизелем, что отвечает требованиям к энергоустановкам [1, 2]. Такого рода ТА берет на себя часть задач по автоматическому регулированию частоты вращения.

2. Имеются и другие положительные стороны использования этой новой ТА. Например, высокое давление впрыскивания, достигающее значений 200–400 МПа. Разумеется, что впрыскивание топлива происходит за более короткий интервал вре-

мени, чем в классической ТА. Положительно решаются вопросы повышения коэффициента полезного действия цикла (топливная экономичность), ликвидации повторных впрыскиваний, т. к. управление завершения подачи осуществляется практически безынерционно при помощи электронного управления электромагнитным или пьезоэлектрическим клапаном [2]. На форсированных по подаче режимах работы классической ТА это практически трудно выполнимо, имеют место повторные впрыскивания, повышенная дымность выхлопа и перерасход топлива при снижении ресурсных показателей.

3. Весьма успешно решается проблема обменных колебаний электрической мощности при параллельной работе дизель-электрических агрегатов переменного тока [3, 4]. При входе системы агрегатов в так называемый режим «тяну-толкаю» (pull-push) система автоматического управления CR воздействует на подачу топлива практически в каждом последовательном впрыскивании и в каждом цилиндре, понижая тем самым амплитуду колебаний крутящего момента дизеля по цилиндрам, и уменьшает размах колебаний электрической мощности. При этом снижается величина обменных перетеканий электрической мощности.

4. Следует отметить высокую степень диагностируемости ТА типа CR, а это свойство оказывает положительное влияние на эксплуатационные показатели двигателя, позволяет своевременно решать вопросы замен элементов ТА, тем самым поддерживая работу на должном уровне качества функционирования.

5. Система CR характеризуется точным регулированием момента начала подачи топлива с обеспечением возможности использования многоступенчатого (многократного) впрыскивания топлива

(в том числе поствпрыскивания топлива со значительным запаздыванием). Система позволяет делать предварительное впрыскивание с целью снижения жесткости сгорания. Именно поэтому система CR позволяет повысить эффективную мощность двигателя, снизить уровень шума и содержание вредных веществ в отработавших газах, она позволяет обеспечить весьма жесткие требования стандартов Евро-5 и Евро-6.

6. Система CR обеспечивает возможность точного регулирования равномерности подач топлива по цилиндрам, особенно на режимах работы дизеля, близких к номинальному. При этом неравномерность подачи на номинальном режиме составляет 2 %, при минимальной подаче – 10–15 %. Это несколько превышает аналогичные показатели классической ТА, для которой неравномерность подачи по секциям на минимальных режимах работы на порядок больше. Межцикловая нестабильность при номинальном режиме составляет 1 %, при минимальной подаче – 10 %, при применении пьезопривода клапана управления – до 6 %. Величина устойчивой минимальной подачи (при двухфазном впрыскивании) составляет 1–3 мм<sup>3</sup>. Это позволяет обеспечить снижение минимальных оборотов под нагрузкой и оборотов холостого хода для судовых, тепловозных и стационарных дизелей.

7. CR достаточно просто обеспечивает сопряжение дизеля с агрегатом турбонаддува, обеспечивая оптимальное регулирование турбокомпрессора.

8. Система CR позволяет отключать ряд цилиндров и обеспечивать пропуски циклов при работе на долевых нагрузках. Она позволяет осуществлять выключение топливоподачи при торможении двигателем при работе на принудительном холостом ходу.

Прежде чем перейти к основным недостаткам так называемой топливной аппаратуры будущего, следует отметить, что системы CR, к сожалению, не обеспечивают оптимальную характеристику впрыскивания. Дело в том, что характеристика впрыскивания у них имеет почти П-образную форму, именно поэтому автоматике (блоку управления) приходится делать пилотный впрыск топлива, обеспечивающий снижение задержки воспламенения, тем самым обеспечивая мягкий характер сгорания [3–5]. Это снижает шумность двигателя и обеспечивает более качественное и экономичное выгорание поданного в цилиндр топлива.

### **Главные недостатки систем впрыскивания типа Common Rail**

1. В систему впрыскивания включено большое число разного рода элементов и датчиков, активаторов и других средств управления (рампа, насос высокого давления, датчик давления в рампе, датчики положений распределительного и коленчатого

валов, датчик потока воздуха, температурные датчики и входящего воздуха, датчик положения педали акселератора, датчик системы подогрева, соленоиды, клапан-регулятор давления в рампе, клапан турбонагнетателя, клапан рециркуляции выхлопных газов, большое количество соединений, в том числе находящихся под высоким давлением и т. п.). Это снижает надежность системы даже при высокой надежности всех ее элементов, что особо важно для дизелей с высокими ресурсными показателями (двигатели СОД и МОД), предназначенными работать в отрыве от баз в течение длительного времени (до полугода).

2. Повышенная требовательность ТА типа CR к чистоте дизельного топлива. Элементы ТА выполнены с прецизионной точностью. При попадании даже мелких посторонних частиц в условиях высокого давления и больших скоростей движения они повреждаются и выходят из строя. В первую очередь это касается управляемых электроникой форсунок с электромагнитными или пьезоэлектрическими клапанами. Попытки использовать низкого качественного топлива или неподходящие топливные фильтры в условиях работы морских дизелей в отрыве судов от баз могут привести к преждевременному и дорогому ремонту или даже к замене элементов системы. Плохо очищенное от воды и твердых частиц топливо и присутствие серы приводит к досрочному отказу элементов ТА. При этом следует иметь в виду дороговизну запасных частей для системы CR. Выполнить необходимые технические обслуживания и ремонты, настройки системы практически не реально. Игнорирование предъявляемых требований приводит к большим экономическим потерям, а в отдельных случаях не обеспечивает поддержание технического состояния и безопасности (в первую очередь для судовых дизелей). Возникают трудности или даже невозможность выполнить ремонт или настройку системы собственными силами, т. к. требуются специальные стенды и инструменты. Нельзя игнорировать при этом все еще недостаточный уровень квалификации персонала для обеспечения диагностики, ремонта и настройки систем CR во многих специализированных сервисах, а тем более при ее эксплуатации на судах или в удаленных от больших городов регионах.

3. Высокие требования предъявляются к форсункам (если форсунка CR начинает «лить»), то последствия могут быть самыми серьезными, вплоть до гидроудара в цилиндре двигателя).

4. При малых подачах давление впрыскивания существенно снижается до величины 60–80 МПа, что приводит к повышенному расходу топлива. В совокупности с имеющей место неравномерностью подач, в том числе от цикла к циклу, связан-

ной с волновыми явлениями в системе высокого давления, качество показателей двигателя аналогично случаю применения классической ТА.

5. Стоимость ТА, согласно статистике, возрастает до 40 % от стоимости самого дизеля (для сравнения стоимость классической ТА составляет 15–20 %). При этом в удаленных районах низка работоспособность и безотказность форсунок, особенно при эксплуатации в условиях России (для дизелей грузовых авто составляет всего 1 000–1 200 моточасов). Восстановление производят путем замены форсунок, при этом цена одной составляет величину порядка 100–120 долл.

6. Пусковые свойства дизеля (как свидетельствует эксплуатация) резко понижаются после 500–800 ч наработки.

7. Возникают проблемы с поддержанием высокого давления в рампе (аккумуляторе). Возможные разрывы и нарушения герметичности системы высокого давления (СВД) ведут к повышенной пожароопасности двигателя. Выдерживающие же высокое давление СВД слишком дороги для массового производства.

8. Игла форсунки, находясь под повышенным

давлением, часто «травит» топливо, имеет место «подтекание». Это приводит к повышенному нагарообразованию и к потере эксплуатационной экономичности и надежности.

#### Анализ применяемости различных типов топливной аппаратуры в будущем

Применяемость на дизелях различных видов ТА в мире представлена в табл. 1. Автотранспорт практически находится в более привилегированном положении в сфере развитого технического обслуживания станций с высококвалифицированным персоналом при раздаче топлива из бензоколонок высокого качества. Другое дело, когда речь идет о судовых двигателях. Здесь топливо располагается в танках большого объема, в которых создаются условия для конденсации воды на стенках цистерн. Поэтому вода все-таки попадает к ТА даже при наличии фильтров. Кроме того, стенки корродируются и оксиды металла в виде мелкозернистых частиц попадают в топливо и в ТА даже при условии отделения воды и твердых частиц в соответствующих устройствах.

Таблица 1

Table 1

**Применяемость различных типов ТА в дизелях**  
**The applicability of various types of fuel equipment in diesels**

Типы систем впрыскивания по применяемым в них топливным насосам высокого давления (ТНВД)	Стационарные ДВС	Легковой автотранспорт	Спецтехника	Грузовой автотранспорт	Пассажирский автотранспорт	Корабли
Common Rail	+	+	+	+	+	+
Индивидуальные ТНВД с электроуправлением	–	–	+	+	+	+
Насос-форсунки	–	+	+	+	+	+
Радиальные распределительные ТНВД	+	+	+	+	–	–
Аксиальные распределительные ТНВД	+	+	+	–	–	–
Индивидуальные механические ТНВД	+	–	–	+	+	+
Рядные ТНВД	+	+	+	+	+	+

Ситуация ухудшается при работе на море, когда в топливо попадают еще и различные соли с последующей их коагуляцией в укрупненные образования. Морские суда, особенно рыбопромыслового флота, работают с отрывом от своих баз до полугода, когда становится невозможным их надлежащее сервисное обслуживание. Напомним, что ТА типа CR крайне чувствительна к различным загрязнениям топлива.

Следует отметить, что ТА – как традиционная,

так и типа CR – до сих пор распространены на флоте примерно в равной степени.

Комиссионная среднестатистическая оценка, выполненная специалистами, а также опрос мнений эксплуатационников с помощью методов относительных штрафных баллов позволили перейти к сравнению качества традиционной ТА и аппаратуры типа CR, что отражено в табл. 2. В каждой колонке по типу дизелей, сравниваемых между собой, ТА типа CR и классической схемы сумма

штрафных баллов равняется 12-и. Подведенный итог сравнения получен в строке 12, где сумма штрафных баллов реализована в процентах. В итоге по штрафным санкциям дизели легковых автомобилей, имеющих ТА типа CR, получают несомненный приоритет по применению в будущем [6].

На грузовых автомобилях ТА типа CR получает также предпочтительное применение в связи с тем, что обслуживание при высокой квалификации технического персонала позволяет обеспечить ее надежную работу и, что важно, выполнить стандарты Евро высокого уровня.

Таблица 2

Table 2

Сравнение качества традиционной ТА (Кл.) и аппаратуры типа CR по методу штрафных баллов

Comparison of the quality of traditional fuel equipment and CR type equipment using the penalty points method

Сравниваемые усредненные показатели дизелей (штрафные баллы ставятся от 0 до 12), %		Легковые автомобилиные		Грузовые автомобилиные		Судовые быстроходные, (б/х)		Судовые среднеоборотные (СОД)		Судовые малооборотные (МОД)	
		CR	Кл.	CR	Кл.	CR	Кл.	CR	Кл.	CR	Кл.
1	По области применения	3	9	4	8	4	8	7	5	10	2
2	По стоимости	7	5	8	4	8	4	10	2	12	0
3	По ресурсу	6	6	8	4	8	4	9	3	12	0
4	По экономичности	2	10	3	9	3	9	4	8	6	6
5	По экологии	2	10	3	9	3	9	4	8	12	0
6	Работоспособность	6	6	8	4	8	4	10	2	12	0
7	Ремонтопригодность	6	6	8	4	8	4	10	2	12	0
8	По сохраняемости	6	6	8	4	8	4	10	2	12	0
9	По безопасности	3	9	6	6	6	6	8	4	12	0
10	Чувствительность к качеству топлива	8	4	9	3	9	3	10	2	12	0
11	Чувствительность к условиям эксплуатации	6	6	6	6	8	4	10	2	12	0
12	Сумма штрафных баллов	55	76	75	55	73	60	97	39	112	8

Применение ТА дизелей (как типа CR, так и классической) для грузового транспорта и для быстроходных судовых двигателей примерно равноценно (в пределах разброса средней арифметической субъективной оценки специалистов). Но вот для судовых дизелей типа СОД и МОД более предпочтительно в будущем применение классической (традиционной) ТА.

Безусловно, уровень качества классической ТА необходимо существенно поднять. Речь идет о повышении давлений впрыскивания хотя бы до 150–250 МПа, об устранении повторных впрыскиваний на номинальных режимах, уменьшении неравномерности подач топлива по секциям многоцилиндрового двигателя на минимальных режимах работы, снижении межциклового нестабильности подач и топлива на режимах малых нагрузок и т. п. Это возможно при соответствующем научно-исследовательском подходе к реализации предъявляемых требований [4, 5].

**Выводы**

1. На основании приведенного анализа очевидно, что ТА типа CR является перспективной для двигателей автомобильного транспорта. Именно он определяет ситуацию с экологией городов, только эта ТА позволяет обеспечивать высокие требования стандартов Евро по экономичности, токсичности отработанных газов, дымности выпуска и шумности.

2. Область неоднозначного применения ТА (как типа CR, так и классической системы) – это двигатели судовые быстроходные и частично среднеоборотные.

3. Часть судовых среднеоборотных дизелей и практически все малооборотные дизели, скорее всего, сохраняют традиционную ТА.

4. Параметры классической ТА следует улучшить путем повышения давлений впрыскивания до 150–250 МПа, устранить повторные впрыскивания на номинальных режимах, уменьшить неравномерность подач топлива по секциям многоцилин-

дрового двигателя на минимальных режимах работы, снизить межцикловую нестабильность подач на режимах малых нагрузок.

5. Опытно-конструкторские доводочные работы следует совмещать с применением математического моделирования процессов впрыскивания.

#### Список источников

1. Астахов И. В., Трусов В. И., Хачиян А. С. и др. Подача и распыливание топлива в дизелях. М.: Машиностроение, 1972. 359 с.
2. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. М.: Легион-Автodata, 2004. 344 с.
3. Конкс Г. А. Исследование причин и методов снижения обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторов ДГР 150/750: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1970. 220 с.

4. Горелик Г. Б. Процессы топливоподачи в дизелях: природа межцикловой нестабильности, моделирование и расчет: моногр. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2015. 246 с.
5. Горелик Г. Б. «Перетекание» электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов и обеспечение качества режимов малых нагрузок: моногр. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2016. 250 с.
6. Грехов Л. В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением: учеб.-практ. пособие. М.: Легион-Автodata, 2008. 176 с.

#### References

1. Astakhov I. V., Trusov V. I., Khachiian A. S. i dr. *Podacha i raspylivanie topliva v dizeliakh* [Fuel supply and spraying in diesel engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 359 p.
2. Grekhov L. V., Ivashchenko N. A., Markov V. A. *Toplivnaia apparatura i sistemy upravleniia dizelei: uchebnik* [Fuel equipment and diesel control systems]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2004. 344 p.
3. Konks G. A. *Issledovanie prichin i metodov snizheniia obmennykh kolebaniy moshchnosti pri parallel'noi rabote dizel'-generatorov DGR 150/750: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of the causes and methods of reducing power exchange fluctuations during parallel operation of diesel generators DGR 150/750: dis. ... candidate of Technical Sciences]. Leningrad, 1970. 220 p.
4. Gorelik G. B. *Protsessy toplivopodachi v dizeliakh: pri-*

- roda mezhtsiklovoi nestabil'nosti, modelirovanie i raschet: monografiia* [Fuel supply processes in diesel engines: the nature of inter-cycle instability, modeling and calculation: monograph]. Khabarovsk, Izd-vo TOGU, 2015. 246 p.
5. Gorelik G. B. *«Peretekanie» elektricheskoi moshchnosti pri parallel'noi rabote dizel'-generatorov i obespechenie kachestva rezhimov malykh nagruzok: monografiia* [“Overflow” of electric power during parallel operation of diesel generators and ensuring the quality of low-load modes: monograph]. Khabarovsk, Izd-vo TOGU, 2016. 250 p.
6. Grekhov L. V. *Toplivnaia apparatura dizelei s elektronnyim upravleniem: uchebno-prakticheskoe posobie* [Fuel equipment of diesel engines with electronic control: an educational and practical guide]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2008. 176 p.

Статья поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 02.11.2023; принята к публикации 24.01.2024  
The article was submitted 12.10.2023; approved after reviewing 02.11.2023; accepted for publication 24.01.2024

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Геннадий Бенцианович Горелик** – доктор технических наук, профессор; старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории междисциплинарных прикладных исследований транспортных систем управления и инновационной деятельности; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; ggorelik@mail.ru

**Gennady B. Gorelik** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Senior Researcher of the Educational and Scientific Laboratory of Interdisciplinary Applied Research of Transport Management Systems and Innovation Activity; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; ggorelik@mail.ru

**Анатолий Николаевич Соболенко** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; sobolenko\_a@mail.ru

**Anatoly N. Sobolenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; sobolenko\_a@mail.ru

**Сергей Витальевич Пастухов** – аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского; Pastukhov@msun.ru

**Sergey V. Pastukhov** – Postgraduate Student of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy; Pastukhov@msun.ru

