

## РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАМАЗ Р6

*И.Ф. Гумеров, к.т.н., зам. ген. директора,  
Д.Х. Валеев, к.т.н., советник ген. директора,  
ПАО «КАМАЗ»*

*А.С. Куликов, гл. констр., Р.Д. Гарипов, нач. отд.,  
А.И. Карпов, зам. гл. констр., Л.И. Фардеев, зам. гл. констр., М.Д. Ханнанов, нач. отд.,  
НТЦ ПАО «КАМАЗ»*

Обоснована актуальность развития конструкции дизельных двигателей коммерческого назначения. Отмечается, что выполнение современных требований по выбросам вредных веществ с отработавшими газами высоконагруженных дизельных двигателей в совокупности с высоким эффективным КПД — важные факторы их конкурентоспособности. Приведены особенности конструкции и результаты испытаний новых рядных дизелей типа Р6, предназначенных для комплектации нового модельного ряда магистральных, транспортных и тяжелых автомобилей КАМАЗ — поколения К5. Комплексный подход к созданию нового семейства дизелей потребовал развития экспериментальной базы для исследования, модернизации технологии серийного производства рядных двигателей. Публикации подготовлена к 50-летию начала строительства КАМАЗа.

### **Актуальность развития конструкции дизелей коммерческого назначения.**

В начале XXI века в мировом автомобилестроении обозначилась тенденция поиска и создания инновационных энергосиловых установок для гибридных и электрических транспортных средств. Однако международный опыт, экспертные оценки специалистов не подтверждают в среднесрочной перспективе в секторе тяжелого грузового транспорта массового спроса на гибридные автотранспортные средства. Также не подтверждается прогноз на массовое использование на тяжелом грузовом транспорте электрического привода вместо механического. В настоящее время внедрение новых продуктов на рынках промышленно развитых стран сдерживается их высокой стоимостью и отсутствием в эксплуатации минимальной инфраструктуры зарядных станций.

Определяя перспективы применения тепловых двигателей на транспорте, необходимо учитывать неоспоримые преимущества дизелей — их соответствие современным требованиям по экологии, высокую топливную экономичность и надежность.

Одной из важнейших задач Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года является обеспечение транспортного комплекса страны конкурентоспособной коммерческой автомобильной техникой отечественного производства, отвечающей современному уровню международных требований по экологическим характеристикам, экономичности и безопасности [1].

В текущем пятилетии ПАО «КАМАЗ» на основе комплексной технологической модернизации приступил к выводу на рынок нового модельного ряда магистральных, транспортных и тяжелых автомобилей (поколения К5) [2].

На основе анализа зарубежного и отечественного опыта двигателестроения, было принято решение комплектовать новый модельный ряд автомобильной техники ПАО «КАМАЗ» прогрессивными по конструкции рядными дизельными двигателями типа Р6. Системный подход к созданию нового поколения дизельных двигателей КАМАЗ Р6 реализован в развитии их конструкции и технологии производства, модернизации исследовательских и испытательных стендов, совершенствовании сервисных технологий.

### **Современные требования к выбросам вредных веществ с ОГ коммерческих дизелей**

В настоящее время одной из главных движущих сил при разработке конструкции коммерческих дизельных двигателей является их соответствие современным законодательным требованиям по выбросам вредных веществ с отработавшими газами (ОГ). Технический регламент (ТР) Таможенного союза (ТС) 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» (с изменениями от 16 февраля 2018 года) осуществляет техническое регулирование в государствах-членах ТС в отношении колесных транспортных средств, обеспечивая социально приемлемый уровень их безопасности [3]. Следует отметить, что требования ТР гармонизированы с требованиями Правила ЕЭК ООН. В соответствии с пунктом 39 изменений, внесенных в ТР, экологический класс 5 (ЕВРО-5) — Правила 49-05 — вступил в действие в ТС с 2018 года.

Таблица 1 Особенности конструкции нового поколения рядных дизелей КАМАЗ Р6

Предельные значения выбросов вредных веществ дизелей экологических классов 5 и 6

Этапы Евро	Испытательные циклы	Оксид углерода (СО)	Углеводороды (НС)	Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )	Твердые частицы (РТ)	Дымность – цикл ELR	Аммиак NH <sub>3</sub>	Количество взвешенных частиц
		г/кВт·ч					м <sup>-1</sup>	ppm
Евро-5	ESC	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	25	—
	ETC	4,0	0,55	2,0	0,03	—	25	—
Евро-6	WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01	—	10	8,0×10 <sup>11</sup>
	WHTC	4,0	0,16	0,46	0,01	—	10	6,0×10 <sup>11</sup>

ESC — Европейский стационарный цикл; WHSC — глобальный стационарный цикл; ETC — Европейский переменный цикл; WHTC — глобальный переменный цикл

В табл. 1 приведены предельные значения выбросов вредных веществ с ОГ дизелей экологических классов 5 и 6. Анализ предельных значений выбросов уровня ЕВРО-6, вступивших в действие в странах ЕС с 2013 года, в сравнении с действующим в ТС уровнем ЕВРО-5, устанавливает значительное ужесточение предельных значений выбросов оксидов азота и твердых частиц. Кроме этого, в экологическом классе 6 вводится ограничение по количеству взвешенных частиц. При подтверждении соответствия коммерческих дизелей требованиям ЕВРО-6 предписывается проведение их испытаний по глобальному стационарному (WHSC) и глобальному переменному (WHTC) циклам [4]. Но наиболее существенным изменением в экологическом классе ЕВРО-6 является введение проверки и подтверждения соответствия

двигателей и транспортных средств, находящихся в эксплуатации, эксплуатационным требованиям на выбросы вредных веществ. Процедура испытаний транспортных средств в эксплуатации предусматривает определение выбросов вредных веществ на основе бортовых измерений — в условиях дорожного движения, с помощью переносных газоанализаторов. На основании результатов испытаний дается оценка соответствия транспортных средств установленным эксплуатационным требованиям.

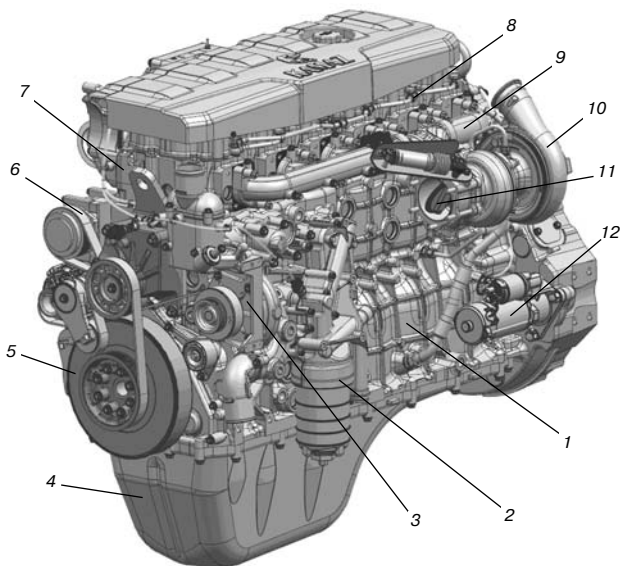
дизелей способствуют повышению их долговечности и безотказности, увеличению ресурса. Снижение шумности шестицилиндрового двигателя достигается отсутствием источника акустических колебаний от неуравновешенности кривошипно-шатунного механизма. Новое семейство коммерческих рядных дизельных двигателей КАМАЗ с рабочим объемом 11,946 литров создано на базе размерности  $D/S = 130/150$  мм с диапазоном мощности 380–550 л. с. при номинальной частоте вращения  $n_n = 1900$  об/мин. Геометрическая степень сжатия дизелей составляет 17,5 единиц. Основные технические параметры рядного семейства дизелей КамАЗ моделей 910.10 представлены в табл. 2.

На рис. 1, 2 представлен общий вид двигателя КАМАЗ модели 910.10-550.

Таблица 2

Основные технические параметры рядного семейства дизелей КАМАЗ

Наименование параметра	Величина параметра в зависимости от модели двигателя				
	910.10-550	910.11-500	910.12-450	910.13-400	910.14-380
1.1.1 Максимальная полезная мощность по ГОСТ Р 41.85 (Правилам ООН № 85-00), кВт (л. с.)	404 (550)	368 (500)	331 (450)	294 (400)	279 (380)
1.1.2 Максимальный полезный крутящий момент по ГОСТ Р 41.85 (Правилам ООН № 85-00), Н·м (кгс·м)	2551 (260)	2305 (235)	2060 (210)	1815 (185)	1717 (175)
1.1.3 Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	1900 ± 25				
1.1.4 Частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, об/мин	1300 ± 50				
1.1.5 Минимальная частота вращения холостого хода, об/мин	600 ± 25				
1.1.6 Максимальная частота вращения холостого хода, об/мин	2150 <sub>-50</sub>				
1.1.7 Минимальный удельный расход топлива (по внешней скоростной характеристике [BCX] двигателя), г/(кВт·ч) [г/(л. с.·ч)]	182 [133,8]				
1.1.8 Расход масла на угар в процентах от расхода топлива на режиме максимальной полезной мощности	Не более 0,05				



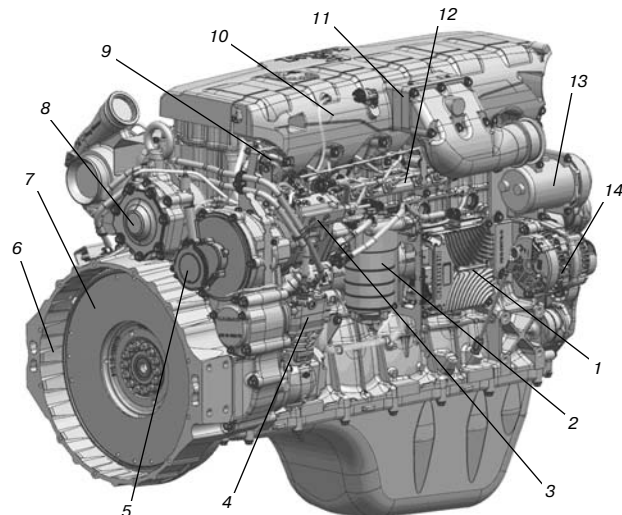
**Рис. 1. Общий вид двигателя (вид слева):**

1 — блок цилиндров; 2 — масляный модуль; 3 — водяной насос; 4 — масляный картер; 5 — демпфер крутильных колебаний; 6 — привод агрегатов передний; 7 — головка цилиндра; 8 — пароотводящий трубопровод; 9 — выпускной коллектор отработавших газов; 10 — турбокомпрессор; 11 — заслонка моторного тормоза; 12 — электростартер

Спереди двигателя на блоке цилиндров смонтирован передний привод агрегатов. Демпфер, предназначенный для снижения амплитуды крутильных колебаний, установлен на переднем бурте коленчатого вала.

На рис. 3 показан привод агрегатов, размещенный на задней вертикальной плоскости блока цилиндров, осуществляемый косозубыми шестернями.

К принципиальным особенностям цилиндропоршневой группы двигателей следует отнести оригинальную конструкцию поршней из легированной стали (рис. 4). Сварка трением поковки поршня позволяет формировать внутренний объем полости масляного охлаждения, расположенный в зоне поршневых колец, что создает благоприятные условия для их работы. Масло из масляной магистрали блока цилиндров под давлением подается в полости охлаждения поршней специальными форсунками. Элементы поперечных сечений поршневых колец оптимизированы в части их приспособляемости к гильзе цилиндра и сниженных потерь на трение. Верхнее компрессионное кольцо имеет износостойкое покрытие на рабочей поверхности и нижнем торце, у второго компрессионного и маслосъемного колец рабочие поверхности «минутного» типов с острой кромкой со стороны нижних торцов. Гильза цилиндров «мокрого» типа изготавливается из специального серого чугуна повышенной твердости. Стальные шатуны имеют

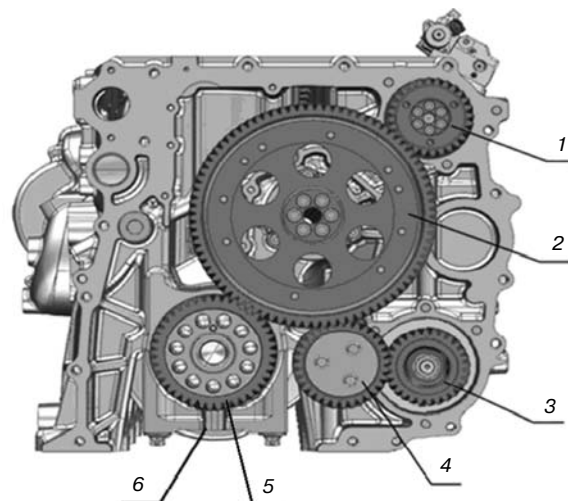


**Рис. 2. Общий вид двигателя (вид справа):**

1 — электронный блок управления; 2 — фильтр тонкой очистки топлива; 3 — топливный насос высокого давления; 4 — воздушный компрессор; 5 — маслоотделитель закрытой системы вентиляции картерных газов; 6 — картер маховика; 7 — маховик; 8 — привод коробки отбора мощности; 9 — клапан управления перепуском отработавших газов; 10 — впускной воздушный коллектор; 11 — электрический нагреватель воздуха; 12 — топливный аккумулятор; 13 — компрессор кондиционера; 14 — генератор

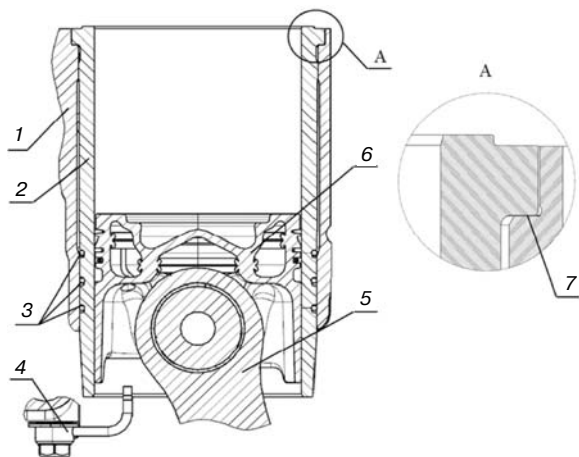
косой сплит — разъем (рис. 5), который в технологии получают методом «разрыва».

Конструкция топливной системы (ТС) рядных дизелей КАМАЗ — ключевой системы в конструкции дизелей — разработана на базе современных компонентов аккумуляторных систем впрыскивания топлива (рис. 6).



**Рис. 3. Привод агрегатов:**

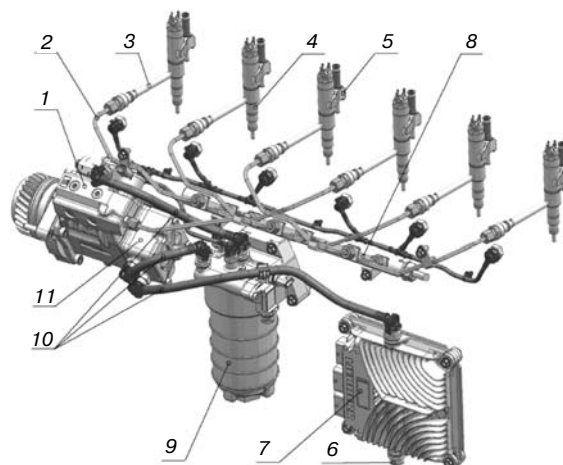
1 — шестерня привода ТНВД; 2 — шестерня распределительного вала; 3 — шестерня воздушного компрессора; 4 — промежуточная шестерня; 5 — шестерня коленчатого вала; 6 — паз под технологический штифт коленчатого вала



**Рис. 4. Установка цилиндропоршневой группы двигателя:**

1 — блок цилиндров; 2 — гильза; 3 — уплотнительные кольца; 4 — форсунка охлаждения поршня; 5 — шатун; 6 — поршень; 7 — листовая прокладка гильзы

В аккумуляторных ТС рабочий процесс создания давления топливным насосом высокого давления (ТНВД) и процесс впрыскивания топлива инжектором разделены аккумулятором, который является накопителем и распределителем топлива. Существенное преимущество современной аккумуляторной системы впрыскивания топлива, в сравнении с традиционными механическими системами, — гибкое управление:



**Рис. 6. Модуль ТС рядных дизелей КАМАЗ:**

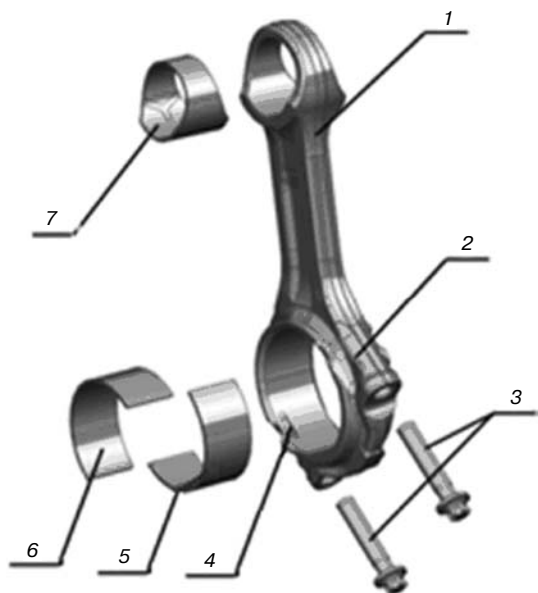
1 — ТНВД; 2 — топливопроводы высокого давления; 3 — штуцер высокого давления; 4 — инжектор; 5 — скоба крепления инжектора; 6 — подвод топлива от фильтра грубой очистки топлива (ФГОТ); 7 — ЭБУ; 8 — топливный аккумулятор; 9 — ФТОТ; 10 — топливопроводы низкого давления; 11 — топливоподкачивающий насос

- давлением впрыскивания топлива;
- моментом впрыскивания топлива;
- обеспечением предварительного и дополнительного впрыскиваний топлива [6].

Следует отметить, что оптимизация вышеперечисленных процессов — управляющих факторов процессами смесеобразования и сгорания — способствует повышению топливной экономичности, снижению выбросов вредных веществ и уровня шума дизелей коммерческого назначения.

Программное обеспечение (ПО) электронного блока управления (ЭБУ) осуществляет, в первую очередь, функции управления и коррекции впрыскивания топлива, кроме этого, управляет всеми параметрами и режимами работы двигателя, контролирует взаимодействие всех систем дизеля, при необходимости по команде системы бортовой диагностики вводит ограничения на функции транспортного средства. ПО ЭБУ — «электронный интеллект» рядных двигателей КАМАЗ Р6 калиброван на испытательных стендах и в условиях реальной эксплуатации.

Задача разработки современного коммерческого дизеля неразрывно связана с использованием в его конструкции эффективной системы газотурбинного наддува, являющейся комплексным средством повышения литровой мощности, снижения удельного эффективного расхода топлива и выбросов вредных веществ. В конструкции рядных дизелей КАМАЗ применена одноступенчатая система турбонаддува с теплообменником охлаждения наддувочного воздуха типа «воздух—воздух» и управляемым перепуском части ОГ мимо колеса турбины.



**Рис. 5. Шатун в сборе:**

1 — стержень шатуна; 2 — крышка шатуна; 3 — болты крепления крышки шатуна; 4 — выточка под фиксирующие усы вкладыша; 5 — вкладыш шатунного подшипника нижний; 6 — вкладыш шатунного подшипника верхний; 7 — втулка верхней головки шатуна

### Испытания на прочность элементов конструкции рядных двигателей КАМАЗ Р6

Надежность и долговечность дизельных двигателей, применяемых на тяжелых грузовых автомобилях, являются обязательными требованиями, формирующими ресурс транспортных средств и, как отмечалось выше, «стабильность» выбросов вредных веществ в эксплуатации. Рационально разработанная конструкция корпусных деталей современных двигателей, в части их материалоемкости, минимальных деформаций и повышенных запасов прочности, — приоритетное требование при создании конкурентоспособного семейства коммерческих дизелей. В связи с этим в НТЦ ПАО «КАМАЗ» разработаны программы — методики проведения прочностных усталостных испытаний корпусных деталей, коленчатого и распределительного валов двигателя Р6.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты прочностных усталостных испытаний блока цилиндров, изготавливаемого из серого чугуна марки СЧ 30, отливка и механическая обработка которого выполняются ПАО «КАМАЗ». Для проведения указанных испытаний была разработана и изготовлена специальная установка, работающая в составе стенда с сервогидравлическим цилиндром (СГЦ) нагружения и автоматической системой управления. На рис. 7 приведен общий вид стенда для проведения прочностных безмоторных испытаний корпусных деталей двигателей КАМАЗ.

Испытания блока цилиндров проводятся при положительном синусоидальном цикле нагружения со ступенчатым увеличением максимальной динамической нагрузки ( $P_{\max}$ ) и неизменной минимальной ( $P_{\min} = 50$  кН). Выбранные значения нагрузки  $P_{\max}$  при испытаниях составляли: 380, 400, 420, 430 кН. Увеличение нагрузки проводится через  $5 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Испытания по ступенчатому циклу проводятся до появления усталостных трещин или разрушения, определяемых визуально. За ограниченный предел выносливости принимается величина  $P_{\max}$  на ступени, предшествующей разрушающей нагрузке —  $P_{\max \text{ разр}}$ . Блок цилиндров рядного двигателя КАМАЗ Р6 при проведении усталостных испытаний в диапазоне изменения  $P_{\max} = 380\text{--}430$  кН не разрушился. Величина коэффициента запаса усталостной прочности  $n_a$  рассчитывалась по формуле

$$n_a = P_{\max} / P_r,$$

где  $P_{\max}$  — ограниченный предел выносливости;  $P_r$  — значение максимальной газовой силы, действующей на коренные опоры блока цилиндров.

При максимальном давлении газов в цилиндре  $P_z = 230$  бар значение  $P_r$  составляет 305,3 кН. При этом рассчитанная величина запаса прочности составила 1,4, что превышает рекомендованное

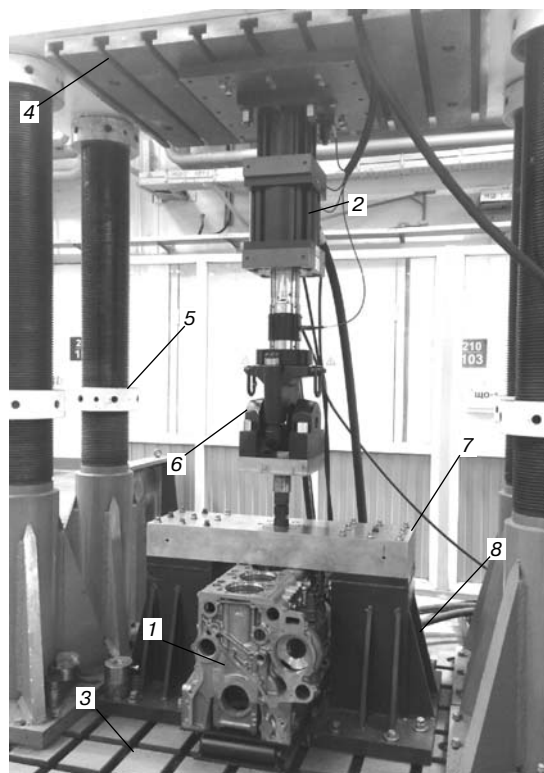


Рис. 7. Общий вид стенда с сервогидравлическим цилиндром для прочностных безмоторных испытаний: 1 — блок цилиндров; 2 — сервогидравлический цилиндр тип 244.41; 3 — пазовая плита нижняя; 4 — пазовая плита верхняя; 5 — колонны с резьбой на стержне; 6 — шарнир штока поршня; 7 — неподвижная поперечина установки; 8 — опоры установки.

в машиностроении значение запаса усталостной прочности — 1,3 [7]. Таким образом, базовый элемент рядных двигателей КАМАЗ — блок цилиндров, имеет потенциал для дальнейшего повышения эффективной мощности двигателя.

### Повышение топливной экономичности — важный фактор конкурентоспособности

Согласно статистике затраты на топливо при эксплуатации тяжелых грузовых автомобилей уровня ЕВРО-5 достигают 30 % от общей суммы затрат [8]. В связи с нарастающими ограничениями в мировой экономике — истощением ресурсов нефти и глобальным потеплением — повышение топливной экономичности дизелей, способствующее снижению выбросов  $\text{CO}_2$ , в ближайшей перспективе имеет первостепенное значение.

Как показывает анализ показателей современных коммерческих автомобилей, оснащенных дизелями экологического класса 5, их минимальный удельный расход топлива находятся в диапазоне 183–186 г/кВт·ч (табл. 3). При этом эффективный КПД дизелей этого класса составляет 42–46 %, что, как правило, достигается комплексом традиционных мероприятий, направленных

Таблица 3

**Анализ рынка коммерческих рядных  
шестицилиндровых дизельных двигателей  
рабочим объемом 12–13 литров**

Основные потребительские свойства	Ед. изм.	Двигатели ведущих мировых производителей	КАМАЗ 910
Номинальная мощность	л. с.	420–530	380–550
Максимальный крутящий момент	Н·м	до 2600	до 2550
Удельная литровая мощность	л. с./л	35–44	до 46
Минимальный удельный расход топлива	г/кВт·ч	183–186	182,0
Периодичность ТО	тыс. км	100–150	150
Ресурс	тыс. км	1000–1500	1500

на повышение качества рабочего процесса. Дальнейшее повышение эффективного КПД до 48 %, согласно выполненным расчетным и результатам экспериментальных исследований, проведенным в ПАО «КАМАЗ», достигается применением в составе двигателей прогрессивных компонентов с повышенной энергоэффективностью и уменьшенными затратами на их привод.

Следует отметить, что по данным зарубежных и российских экспертов в сфере разработки коммерческих дизелей уже в ближайшем десятилетии их эффективный КПД достигнет значения 50 % за счет внедрения системы рекуперации энергии ОГ.

В табл. 3 приведены результаты анализа рынка (бенчмаркинг) коммерческих рядных шестицилиндровых двигателей ЕВРО-5 по основным потребительским свойствам. Следует отметить преимущество дизеля КАМАЗ Р6 над зарубежными предшественниками-аналогами: по минимальному удельному расходу топлива, номинальной и удельной литровой мощностям. Указанные преимущества объясняются оптимизацией элементов конструкции дизеля КАМАЗ Р6 на стадии его разработки для создания потенциала выполнения требований ЕВРО-6, а также реализации мероприятий по повышению качества рабочего процесса.

**Особенности организации рабочего процесса  
дизельных двигателей КАМАЗ Р6**

**Ограничения в организации рабочего процесса.**

Целевым положением при создании конструкции дизельных двигателей КАМАЗ Р6 уровня ЕВРО-5, а также при создании в их конструкции потен-

циала выполнения требований ЕВРО-6 стала организация высокоэкономичного рабочего процесса с наименьшим выбросом с ОГ вредных веществ и, в первую очередь оксидов азота и твердых частиц, механизм образования которых характеризуется обратной взаимозависимостью. Любое воздействие на рабочий процесс дизеля, например уменьшение угла опережения впрыскивания топлива, вызывающее снижение  $\text{NO}_x$ , приводит к возрастанию РТ по гиперболической зависимости. В связи с этим на стадии разработки рабочего процесса дизельных двигателей КАМАЗ Р6 широко использовались расчетные и экспериментальные методы, позволяющие оптимизировать выбор элементов конструкции в целях достижения компромисса между факторами, формирующими высокоэкономичный рабочий процесс и низкий уровень выбросов ВВ, а также сократить сроки разработки двигателей. Эти цели должны быть достигнуты при значении максимального давления сгорания в цилиндре ( $P_{z \max}$ ) не более 230 бар и без применения в конструкции двигателей (на этапе ЕВРО-5) системы рециркуляции отработавших газов (EGR).

Сценарий рабочего процесса дизеля «без EGR», т. е. снижение выбросов  $\text{NO}_x$  только за счет очистки ОГ в реакторе селективного каталитического восстановления (SCR), упрощает конструкцию дизеля в целом, снижает его удельные массогабаритные показатели, создает более благоприятные условия для применения системы одноступенчатого турбонаддува, а также позволяет увеличить интервал периодичности технического обслуживания автомобилей, снизить эксплуатационные затраты. При этом необходимо иметь в виду, что в условиях реальной эксплуатации коммерческие автомобили, укомплектованные дизелями уровня ЕВРО-5 «только SCR» по расходу мочевины незначительно уступают автомобилям с дизелями ЕВРО-5 с «EGR + SCR», но по сумме затрат в эксплуатации, в силу перечисленных выше преимуществ, вариант без EGR выгоднее.

**Формирование процессов смесеобразования и сгорания в дизелях КАМАЗ Р6**

На стадии разработки конструкции рядных дизелей КАМАЗ Р6, а также при формировании их рабочих процессов использовались технологии, позволяющие методом расчетного моделирования оптимизировать:

- конструкцию впускных каналов для организации вихревого движения воздушного заряда в цилиндре дизеля;
- характеристики впрыскивания топлива и процесс смесеобразования;
- характеристики сгорания и тепловыделения;
- образование токсичных компонентов.

Прогресс в развитии аккумуляторных систем топливоподачи (типа «Common Rail»), применяемых на современных дизелях коммерческого назначения, изменил требования к интенсивности вихревого движения воздушного заряда ( $\omega_v$ ), формируемого формой впускных каналов. Намечалась тенденция к генерации более низких значений  $\omega_v$ , что позволило упростить конфигурацию впускных каналов, значительно снизить их гидравлическое сопротивление, повысить коэффициент наполнения при впуске. Опыт научно-исследовательских работ по развитию рабочего процесса дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива в камеру сгорания в поршне, показывает, что воздушный вихрь, организуемый в цилиндре и камере сгорания дизеля, интенсифицирует процессы испарения впрыснутого топлива, смесеобразования и сгорания. И самое главное — в камере сгорания дизеля значение  $\omega_v$  должно быть оптимальным [9]. При проектировании рабочего процесса рядных дизелей КАМАЗ Р6 на основе выполненных термодинамических расчетов был сделан выбор в пользу организации рабочего процесса с «умеренной» степенью закрутки воздушного заряда при значении приведенного вихревого числа 1,5–2,0.



**Рис. 8. Общий вид установки стационарной продувки впускных каналов головок цилиндров дизелей КАМАЗ Р6:**

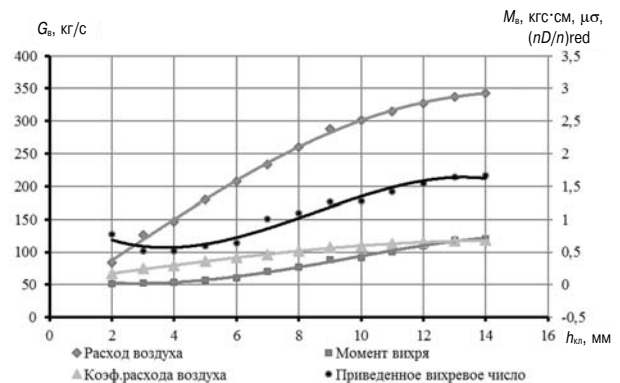
1 — корпус установки; 2 — пульт управления; 3 — головка цилиндров в сборе; 4 — проставка; 5 — гильза; 6 — тензометрический цифровой индикатор

С целью проведения исследовательских работ в НТЦ ПАО «КАМАЗ» была усовершенствована установка стационарной продувки впускных каналов модели SF-1020 (рис. 8). В исходной комплектации установки на ее верхней плите устанавливается модуль — головка цилиндра в сборе с гильзой. Во внутренней нижней части гильзы устанавливается двухлопастный анемометр. Открытый выход из гильзы цилиндра, внутри стенда, сообщается с входом имеющихся в составе установки четырнадцати реверсивных воздушных компрессоров. Компрессоры прокачивают атмосферный воздух через открытые клапаны впускных каналов головки цилиндра. Система управления установки позволяет регулировать расход воздуха изменением количества работающих компрессоров и измерять:

- давление и температуру воздуха;
- сопротивление впускных каналов при различных подъемах клапанов;
- тангенциальную составляющую воздушного вихря в цилиндре, фиксируя частоту вращения двухлопастного анемометра.

Усовершенствованная конструкция установки дополнена гильзой, доработанной под установку в ее нижней части колеса с радиальными лопатками на подшипниках качения, которое воспринимает результирующий момент вихревого движения заряда —  $M_v$ . Усилие на колесе фиксируется дополнительным силоизмерительным каналом. Накопленный опыт исследований газодинамических характеристик впускных каналов показывает, что при «низкой и умеренной» значениях закрутки воздуха впускными каналами методика, основанная на измерении  $M_v$ , позволяет получать большую стабильность и воспроизводимость результатов.

На рис. 9 представлены результаты контрольных газодинамических испытаний впускных каналов серийной головки цилиндра, изготовленной в технологии ПАО «КАМАЗ». Следует отметить,



**Рис. 9. Результаты испытаний впускных каналов серийной головки цилиндров методом стационарной продувки**

Параметры впрыскивания топлива и максимальное давление сгорания при работе дизеля КАМАЗ мод. 910.10-550 по ВСХ

№ п/п	Параметры рабочего процесса	Единицы измерения	Частота вращения коленчатого вала, об/мин					
			900	1100	1300	1500	1700	1900
1	Часовой расход топлива $G_T$	кг/ч	37,0	54,0	64,6	73,9	78,0	80,6
2	Цикловая подача топлива $Q_{ц}$	мг/цикл	228,8	273,3	275,9	273,7	254,9	235,6
3	Давление впрыскивания топлива $p_{вп.}$	бар	1060	1175	1320	1460	1690	1800
4	Угол опережения впрыскивания топлива $\theta$	град ПКВ	7,0	9,4	10,6	11,8	12,8	14,3
5	Продолжительность впрыскивания топлива $\Phi_{вп.}$	град ПКВ	14,9	19,1	22,6	24,3	23,6	23,5
6	Максимальное давление сгорания топлива $P_{z \max}$	бар	173,0	222,0	230,0	222,0	213,0	215,0

что сравнение экспериментально полученных энергетических параметров впускных каналов (момента вихря, приведенного вихревого числа) показывает их тождественность расчетным целевым значениям, полученным в результате термодинамического моделирования.

На рис. 10 представлена схема непосредственного впрыскивания топлива в КС дизелей КАМАЗ Р6. Как отмечалось выше, значение геометрической степени сжатия (17,5 единиц), форма и соотношения элементов КС определялись с учетом результатов термодинамических расчетов. Впрыск топлива в камеру сгорания осуществляется центрально расположенным инжектором через распылитель, имеющий восемь равномерно расположенных распыливающих отверстий. Пропускная способность распылителя (пролив), при давлении 100 бар составляет 1100 см<sup>3</sup>/30 с. Электромагнитный клапан (ЭМК), встроенный в инжектор, по команде ЭБУ управляет подачей топлива. Продолжительность открытия ЭМК и уровень давления топлива в аккумуляторе определяют цикловую подачу топлива. В табл. 4 приведены параметры впрыскивания топлива при работе дизеля КАМАЗ Р6 мод. 910.10-550 по внешней скоростной характеристике (ВСХ), оптимизированные в ходе проведения исследований.

Комплекс стендовых испытаний нового семейства рядных дизелей КАМАЗ подтвердил их соответствие требованиям установленным техническими условиями. При этом экспериментально определен минимальный удельный расход топлива в диапазоне частот вращения коленчатого вала, соответствующих максимуму крутящего

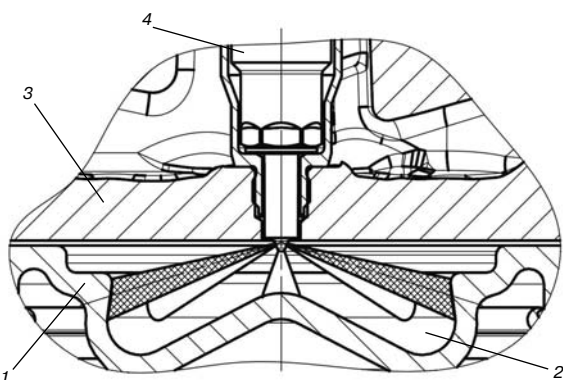


Рис. 10. Схема непосредственного впрыскивания топлива в КС дизелей КАМАЗ Р6:

1 — поршень в положении ВМТ; 2 — камера сгорания; 3 — головка цилиндра; 4 — инжектор впрыскивания топлива

момента, составляет 182,0 г/кВт·ч, а величина эффективного КПД достигает значения 46,5 %.

Результаты контрольных и сертификационных испытаний дизеля мод. 910.10-550 с определением выбросов вредных веществ по циклам ESC, ETC, ELR Правил ЕЭК ООН № 49-05 (ЕВРО-5) показали, что качество рабочего процесса обеспечивает выполнение требований по предельным значениям выбросов CO, CH, PT, а также их стабильность, определяемую через факторы ухудшения. С целью выполнения требований Правил ООН № 49-05 (ЕВРО-5) по выбросам NO<sub>x</sub> < 2,0 г/кВт·ч в системах выпуска автомобилей КАМАЗ с двигателями семейства 910.10, применяется технология SCR — селективного каталитического восстановления оксидов азота аммиаком, образующимся в процессе разложения раствора мочевины (коммерческое обозначение AdBlue) [10]. В состав системы обработки ОГ входят:

- каталитический блок, размещенный в корпусе глушителя;
- бак для нейтрализующей жидкости (НЖ) — AdBlue с системой подогрева, датчиками уровня и температуры НЖ;
- дозирующий насос и форсунка подачи НЖ в поток ОГ;
- датчик NO<sub>x</sub> на выходе ОГ из корпуса глушителя;
- подогреваемых трубопроводов подвода и отвода НЖ;
- ЭСУ управления дозированием НЖ и функциями бортовой диагностики.

**Развитие экспериментальной базы испытаний двигателей»**

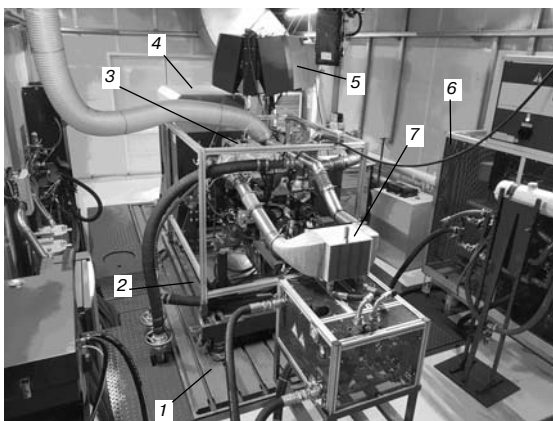
В ПАО «КАМАЗ» исследовательские испытания двигателей нового поколения выполняются



на моторных стендах с тормозными динамометрами асинхронного типа. Системы их нагружения позволяют проводить испытания двигателей с номинальной мощностью до 700 и 1000 л. с. Паллетные системы (тележки), входящие в состав стендового оборудования, используются как модули для подготовки двигателей к испытаниям на специализированном участке — вне стенда, что значительно повышает эффективность использования моторных стендов. В состав паллет входят устройства центровки двигателя и стыковки с подмоторной плитой. Общий вид испытательного бокса с размещением основного оборудования представлен на рис. 11. Целевые параметры, необходимая точность и воспроизводимость результатов исследовательских испытаний, в первую очередь по выбросам вредных веществ с ОГ, обеспечивается следующим базовым оборудованием:

- системами кондиционирования воздуха на впуске, охлаждающей жидкости и наддувочного воздуха;
- комплексом газоаналитического оборудования для измерения концентраций вредных веществ до и после системы нейтрализации ОГ;
- системами измерения массовых выбросов частиц и количества взвешенных частиц в ОГ;
- расходомерами измерения массового расхода воздуха, дизельного (газового) топлива;
- модулем измерения температур и давлений.

Исследования рабочего процесса, характеристик тепловыделения, индикаторных показателей во взаимосвязи с изменением элементов конструкции и режимами работы новых рядных двигателей при проведении стендовых испытаний выполняются 16-канальной системой индицирования.



**Рис. 11. Общий вид испытательного стенда дизелей КАМАЗ:**

1 — подмоторная плита; 2 — паллета; 3 — двигатель; 4 — нагружающее устройство; 5 — кабельная консоль с измерительными модулями; 6 — устройство кондиционирования охлаждающей жидкости; 7 — устройство кондиционирования наддувочного воздуха

В состав модуля измерения температур и давлений входят:

- 40 каналов измерения температур;
- 32 канала измерения давлений.

Программное обеспечение систем управления испытательными стендами позволяет проводить испытания двигателей по стационарным и динамическим циклам в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН № 49-05 и 49-06.

#### **Развитие технологии серийного производства рядных дизелей КАМАЗ Р6.**

Технологическая подготовка серийного производства деталей двигателя — блок цилиндров, головка цилиндра, коленчатый вал, маховик, картер маховика — реализована на современном оборудовании мировых станкостроительных производителей. Отличительными особенностями модернизированной технологии являются:

- универсальность оборудования с возможностью быстрой переналадки с применением ЧПУ;
- автоматизированный контроль размеров при обработке;
- возможность регулировать процесс изготовления деталей.

Технологическое оборудование снабжено встроенной системой защиты от неправильной установки детали в приспособление станка, автоматизирован контроль соответствия установок комплектующих. Все оборудование оснащено системой прослеживаемости, что обеспечивает 100 %-ный контроль соответствия хода производства технологическим требованиям. Предусмотрен также 100 %-ный контроль особо ответственных (ключевых) параметров и активный контроль износа режущего инструмента при обработке.

На всех линиях предусмотрен ручной межоперационный контроль, который с помощью системы WF обеспечивает передачу измерений на рабочее место наладчика. Одновременно проводится статистический анализ данных с помощью системы Q-Das.

Основное технологическое оборудование — современные обрабатывающие центры, которые используются при изготовлении блока и головки цилиндра. При обработке блока цилиндров достижение требуемых параметров по точности размеров и шероховатости поверхностей обеспечивается за счет применения специального режущего инструмента и режимов резания, что позволяет исключить операции шлифовки и хонингования отверстий под коленчатый и распределительный валы и толкатели. Кроме этого, при изготовлении блока цилиндров применяется специальная моечная машина, обеспечивающая высокое качество промывки с одновременным снятием заусенцев — за счет приме-

нения направленных сопел с давлением 600–800 бар. В новой технологической линии осуществляется полный цикл обработки блока — механическая обработка, сборка с крышками, втулками, заглушками, контроль герметичности, межоперационный контроль размеров детали.

Обработка головки цилиндра осуществляется на гибкой производственной линии, в которой предусмотрен контроль герметичности и мойка деталей. Сборка головки цилиндра с седлами, втулками, заглушками осуществляется технологическими роботами. Все критические параметры обеспечиваются 100 %-ным контролем с наличием обратной связи. Специальные измерительные машины, включая кругломер и контурограф, контролируют в линии требования к некруглости деталей, требования по шероховатости, диаметральные допуски.

Коленчатый вал — одна из базовых, наиболее ответственных и дорогостоящих деталей дизеля, обрабатывается на автоматизированной линии с особыми требованиями к качеству технологического процесса. Обработка коренных и шатунных шеек осуществляется на современном шлифовальном оборудовании, где за одну установку шлифуются коренные и шатунные шейки специальными кругами с высокой скоростью и с последующей обработкой на полировальном станке. Перемещение коленчатого вала по линии осуществляется с помощью порталного загрузчика. В линии 100 %-ный контроль всех размеров коленчатого вала выполняется на измерительной машине фирмы «Марпосс». Сборка коленчатого вала с шестернями и фланцем осуществляется без присутствия оператора — технологическим роботом.

Общей особенностью всех модернизированных в ПАО «КАМАЗ» технологических процессов является мониторинг работы оборудования с выводом информации в онлайн-режиме руководителям производства. Кроме этого, обеспечивается анализ простоев: отсутствие инструмента, оператора, смазочно-охлаждающей жидкости и т.д. Также система мониторинга позволяет фиксировать изменения в управляющих программах.

#### Выводы.

1. Комплексный подход ПАО «КАМАЗ» к развитию конструкции рядных шестицилиндровых дизельных двигателей позволил создать семейство коммерческих двигателей моделей 910.10 с диапазоном эффективной мощности 380–550 л. с., и эффективным КПД на режиме максимального крутящего момента, равном 46,5 %.

2. Качество рабочего процесса нового семейства дизелей КАМАЗ достигнуто за счет совокупной оптимизации:

➤ формы камеры сгорания и интенсивности вихревого движения воздушного заряда;

➤ расположения топливных факелов в объеме КС;

➤ начала, продолжительности и интенсивности впрыскивания топлива.

3. По выбросам вредных веществ с ОГ новое семейство рядных дизелей КАМАЗ соответствует требованиям ЕВРО-5:

➤ по CO, CH, PT без дополнительных устройств очистки выбросов;

➤ по NO<sub>x</sub>, без системы рециркуляции ОГ — с применением технологии SCR на основе 30 %-ного раствора мочевины (AdBlue).

4. Развитие конструкции рядных дизелей КАМАЗ Р6, модернизация экспериментальной базы исследований и испытаний новых рядных двигателей, технологии их серийного производства создают потенциал для выполнения требований ЕВРО-6.

#### Литература

1. Стратегия развития автомобильной промышленности России, [economy.government.ru](http://economy.government.ru)
2. Программа стратегического развития ПАО «КАМАЗ» на период до 2025 года, [www.kamaz.ru/about/development/strategy](http://www.kamaz.ru/about/development/strategy)
3. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 О безопасности колесных транспортных средств (с изменениями на 16 февраля 2018 года), [www.eaeunion.org](http://www.eaeunion.org), 15.05.2018.
4. Правила ООН № 49-06. Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц двигателями с воспламенением от сжатия и двигателями с принудительным зажиганием, предназначенными для использования на транспортных средствах. Поправки серии 06. E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.48/Rev.6
5. Григорьев М.А., Долецкий В.А., Желтяков В.Т., Субботин Ю.Г. Обеспечение качества транспортных двигателей. Т. 1. Москва, ИПК Изд. стандартов. 1998. — 629 с.
6. Райф К. Системы управления дизельными двигателями. Москва, За рулем, 2013. — 232 с.
7. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Москва, Машиностроение. 1975. — 488 с.
8. Мозер Ф.К., АВЛ Лист ГмбХ. Тенденции и решения в разработке коммерческих дизельных двигателей. Международная научно-техническая конференция, 24–25 июня, 2009, Протвино. — 18 с.
9. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. Москва, изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 720 с.
10. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-14. Двигатели внутреннего сгорания. Ответственный редактор академик РАН К.С. Колесников. Москва, Машиностроение, 2013. — 783 с.